



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Propuesta de diseño de un paquete de tejado verde para un edificio de Barcelona

Treball realitzat per:

Andrea Bárcena Pasamontes

Dirigit per:

Manuel Gómez Valentín i Beniamino Russo

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 16/06/2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

RESUMEN

El uso de tejados verdes supone una oportunidad para reducir el impacto medioambiental y las consecuencias negativas que conlleva la urbanización del territorio. Además es una medida que permite alcanzar el objetivo de ciudades y comunidades sostenibles propuesto por la Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La tendencia de la población a desplazarse hacia las ciudades y el crecimiento de las urbes tiene importantes implicaciones negativas en el funcionamiento de la red de drenaje, aumentando el riesgo de inundación. La urbanización supone la transformación del medio natural en cuencas impermeables que reducen la infiltración del agua de lluvia, aumentan la escorrentía natural y la velocidad a la que ésta discurre, provocando así la incapacidad de la red de drenaje para evacuar toda el agua. En los últimos años ha surgido un cambio de filosofía en la concepción de las redes tradicionales de drenaje, lo que se conoce como sistemas urbanos de drenaje sostenible. Estas nuevas técnicas tienen como objetivo mantener o reproducir el régimen hidrológico previo al desarrollo urbanístico contribuyendo al desarrollo sostenible. Gestionan el agua superficial considerando la cantidad, calidad y revalorización del agua de lluvia.

En este trabajo se ha realizado un estudio cuantitativo de los beneficios que suponen los tejados verdes en términos de reducción de escorrentía mediante la herramienta SWMM5. Se demuestra que la disposición de una capa de tierra cubierta de plantas locales permite ralentizar el paso de la escorrentía generada en un tejado urbano y almacenar parte de la lluvia caída.

Se propone diseñar un paquete de terreno a disponer en un tejado evaluando los aspectos hidrológicos y estructurales, comprobando el efecto de reducción de escorrentía en términos de volumen total, caudal pico y tiempo de concentración. Se analizará el comportamiento a lo largo de un año empleando una serie de lluvias locales registradas en intervalos de tiempo de cinco minutos y eventos de lluvias extremos asociados a diferentes periodos de retorno.

Palabras clave: hidrología, drenaje urbano sostenible, SWMM5, tejados verdes.

ABSTRACT

The implementation of green roofs means an opportunity to reduce the environmental impact and negative consequences that the urbanization of the cities implies. Moreover, it is a good approach to reach the objective of sustainable cities and communities proposed by United Nations Development Programme (UNDP) to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs).

The trend of people moving to cities with the eventual growth of metropolis has a marked negative impact in the correct function of the drainage system increasing the flood risk. Urbanization implies the transformation of the natural media into impervious sub-catchments which reduces the rain water infiltration and increases the runoff and its velocity through the streets. These facts lead to the incapacity of the drainage system to evacuate all the runoff.

In the last years, it has arisen a conceptual change in the way we conceive the traditional drainage systems, the so-called sustainable drainage systems. These new techniques aim at maintaining or reproducing the hydrological regime previous to the urban growth, contributing to a sustainable development of the cities. They focus on the management of the superficial water by considering quantity, quality and revalorization of the runoff water.

In this project, a quantitative study of the benefits that green roofs imply in terms of runoff reduction has been developed using the software SWMM5. The placement of a substrate layer and a mat of local plants hampers the formation of the runoff generated in a roof, and stores part of the rain.

Herein, we propose the design of a green roof pack, evaluating the hydrological and structural aspects. The effect of runoff reduction has been proven in terms of runoff volume, peak flow and concentration time. This analysis has been carried out for the performance of a green roof along a complete year using local rainfall data registered at intervals of five minutes, and also with designed rainfall events associated to a specific return period.

Key words: hydrology, sustainable urban drainage, SWMM5, green roofs.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres por haberme hecho ser quien soy y por haberme dado tanto. Todos los méritos que consiga en mi vida serán vuestros, os debo todo. Os quiero.

Gracias a mi hermana. Lucía, sin ti no habría empezado mi aventura con la ingeniería civil. Aunque en la distancia y a 20°C de diferencia, siempre estaremos juntas, te quiero.

A todas las personas que he conocido en el camino, en Córdoba, Ciudad Real, Lieja o Barcelona. De cada uno de vosotros me llevo experiencias, conversaciones, viajes, momentos de estudio y agobio pero también risas, muchas risas. Lo mejor está todavía por venir. Gracias por haber aparecido en mi vida.

Gracias por el tiempo, apoyo y guía a Manuel Gómez y Beniamino Russo, tutores de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	ii
Abstract.....	ii
Agradecimientos.....	iv
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
1. Introducción	1
1.1. <i>Objetivos</i>	<i>2</i>
1.2. <i>Estructura del documento.....</i>	<i>2</i>
2. Hidrología urbana	4
2.1. <i>Incidencia de la urbanización en el drenaje de aguas pluviales.....</i>	<i>4</i>
2.2. <i>El clima mediterráneo</i>	<i>6</i>
2.2.1. <i>Variabilidad espacial y temporal</i>	<i>7</i>
2.2.2. <i>Irregularidad diaria y contribución al total anual.....</i>	<i>7</i>
2.2.3. <i>Marcada estacionalidad</i>	<i>7</i>
2.2.4. <i>Escasa duración, persistencia y alta intensidad</i>	<i>7</i>
2.2.5. <i>Dificultad de previsión</i>	<i>8</i>
2.3. <i>Consecuencias de las inundaciones.....</i>	<i>8</i>
3. La resiliencia y el drenaje urbano sostenible	9
3.1. <i>Limitaciones de los sistemas de drenaje convencionales.....</i>	<i>9</i>
3.2. <i>Introducción a las técnicas de drenaje urbano sostenible</i>	<i>10</i>
3.3. <i>Clasificación de las técnicas LID</i>	<i>12</i>
3.3.1. <i>Prevención.....</i>	<i>12</i>
3.3.2. <i>Medidas en origen.....</i>	<i>13</i>
3.3.3. <i>Control en vertido y transporte</i>	<i>13</i>
3.3.4. <i>Control regional.....</i>	<i>13</i>
4. Tejados verdes.....	14
4.1. <i>Introducción histórica</i>	<i>14</i>
4.2. <i>Aspectos generales y tipos.....</i>	<i>14</i>
4.3. <i>Aspectos técnicos e ingenieriles</i>	<i>17</i>
4.3.1. <i>Membrana impermeable</i>	<i>18</i>
4.3.2. <i>Capa drenante.....</i>	<i>18</i>
4.3.3. <i>Capa filtrante.....</i>	<i>19</i>
4.3.4. <i>Capa de sustrato</i>	<i>19</i>
4.3.5. <i>Capa de vegetación</i>	<i>21</i>
4.3.6. <i>Estructura del tejado y tipología de cubiertas</i>	<i>23</i>
4.3.7. <i>Espacio disponible</i>	<i>27</i>
4.3.8. <i>Evacuación de las aguas</i>	<i>27</i>
4.3.9. <i>Accesos</i>	<i>28</i>
4.3.10. <i>Capacidad estructural</i>	<i>28</i>
4.3.11. <i>Resistencia al fuego.....</i>	<i>29</i>
4.3.12. <i>Resistencia al viento.....</i>	<i>30</i>
4.3.13. <i>Operaciones de mantenimiento</i>	<i>31</i>
4.4. <i>Beneficios.....</i>	<i>32</i>

4.4.1.	Aislamiento térmico	32
4.4.2.	Aislamiento acústico	32
4.4.3.	Beneficios en la edificación	33
4.4.4.	Mitigación de la isla de calor	33
4.4.5.	Reducción de escorrentía.....	33
4.4.6.	Biodiversidad.....	34
4.4.7.	Mitigación del cambio climático	35
4.4.8.	Aspectos sociales.....	35
4.5.	Coste	36
4.5.1.	Análisis coste – beneficio	36
4.6.	Experiencias a nivel internacional y nacional.....	37
4.7.	Inventivos y subvenciones del Ajuntament de Barcelona	38
4.8.	Retos futuros.....	39
5.	SWMM 5.1	41
5.1.	Introducción	41
5.2.	Modelo conceptual	41
5.3.	Modelos de cálculo	42
5.3.1.	Modelo de lluvia-escorrentía	42
5.3.2.	Retención e intercepción	43
5.3.3.	Evapotranspiración	43
5.3.4.	Modelo de infiltración.....	44
5.3.5.	Modelo hidráulico de transporte	45
5.3.6.	Selección de modelos.....	47
5.4.	Técnicas LID con swmm5	47
5.4.1.	Aplicación de las técnicas LID en las sub-cuencas (“LID group editor”)	51
6.	Características del caso de estudio	53
6.1.	Pluviometría	53
6.2.	Características cubiertas.....	55
6.2.1.	Características de los paquetes de tejado verde	55
6.2.2.	Sobrecargas.....	58
7.	Eventos aislados.....	60
7.1.	Pluviometría	60
7.2.	Resultados para diferentes grosores.....	62
7.2.1.	T = 2 años	63
7.2.2.	T = 5 años	64
7.2.3.	T = 10 años	65
7.3.	Análisis de sensibilidad.....	66
7.3.1.	Permeabilidad	66
7.3.2.	Modificar capacidad de retención.....	68
7.3.3.	Sin berma	69
7.4.	Conclusiones.....	70
8.	Modelización continua.....	72
8.1.	Pluviometría	72

8.1.1.	Lluvia efectiva y coeficiente de escurrentia	74
8.2.	Evapotranspiración	75
8.3.	Escenario 1	78
8.3.1.	Barcelona	79
8.3.2.	Granollers	85
8.4.	Escenario 2	89
8.4.1.	Barcelona	89
8.4.2.	Granollers	90
8.5.	Efecto del cambio climático	90
8.6.	Conclusiones	92
9.	Conclusiones	94
10.	Referencias	96

ANEJO I: LLUVIAS DE DISEÑO

ANEJO II: EVENTOS AISLADOS

ANEJO III: SIMULACIÓN CONTINUA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución de la ocupación del suelo [4].....	5
Figura 2: efectos sobre el hidrograma de una cuenca natural a una urbana	6
Figura 3: Jerarquización de la gestión de aguas pluviales [12]	12
Figura 4: de izquierda a derecha (1) jardines colgantes de Babilonia, (2) zigurats en Mesopotamia, (3) Couvert de la Tour, Le Corbusier (4) ejemplo de arquitectura típica escandinava.....	14
Figura 5: Capas de un paquete de tejado verde [15].....	15
Figura 6: Granulometría del sustrato con capa drenante	20
Figura 7: Granulometría sustrato sin capa drenante.....	21
Figura 8: Medidas de seguridad para tejados inclinados [19]	23
Figura 9: Barrera anti-empuje [19].....	23
Figura 10: Sistema de tejado verde inclinado 10°-25° [19].....	24
Figura 11: Sistema de tejado verde inclinado 26°-35° [19]	24
Figura 12: sistema cubiertas planas "Sedum tapizante" [20].....	25
Figura 13: sistema cubiertas planas "tapizante floral" [20].....	25
Figura 14: sistema cubiertas planas "tapizante floral, cubierta invertida" [20].....	26
Figura 15: Ejemplo de sistemas modulares. Fuente: www.greenroofs.com	27
Figura 16: Sumidero en un tejado verde [20]	27
Figura 17: Medidas contra incendios.[21].....	30
Figura 18: Protección contra incendios.....	31
Figura 19: variación de la temperatura superficial con sustrato <100mm (izquierda) sin riego (derecha) con sistema de riego	32
Figura 20: Modificaciones en el hidrograma.....	34
Figura 21: Cubierta verde de la Biblioteca municipal Zona Nord. Nou Barris	38
Figura 23: Esquema del modelo	41
Figura 24: Modelo de depósito no lineal (derecha) y conceptualización de una sub-cuenca (izquierda) [27]	42
Figura 25: Diagrama conceptual de un paquete de tejado verde	48
Figura 26: Esquema de implementación de técnicas LID en SWMM5 [27]	49
Figura 27: Esquema de una cubierta verde en SWMM5.....	50
Figura 28: Localización de los datos pluviométricos registrados	55
Figura 29 : Curvas IDF asociadas a cada periodo de retorno	61
Figura 30: Hietogramas de diseño.....	62
Figura 31: Cálculo de eventos aislados. Precipitación T=2años.....	63
Figura 32: Cálculo de eventos aislados. Precipitación T=5años.....	64
Figura 33: Cálculo de eventos aislados. Precipitación T=10años	65
Figura 34: Análisis de sensibilidad de la permeabilidad. Lluvia asociada a T=10años	67
Figura 35: Análisis de sensibilidad de la capacidad. Lluvia asociada a T=10años.....	68
Figura 36: Análisis de sensibilidad sin berma. Lluvia asociada a T=10años.....	69
Figura 37: Precipitación acumulada. Granollers 1988.....	73
Figura 38: Precipitación acumulada. Barcelona 2010.....	73
Figura 39: Factores que afectan la ET [32]	75
Figura 40: ET ₀ , ET _C y ET _{Caj}	76
Figura 41: Agua retenida CV1-200mm - Barcelona 1	80
Figura 42: Escenario 1 - Barcelona - Evento 1.....	81
Figura 43: Escenario 1 - Barcelona - Evento 2.....	82

Figura 44: Escenario 1 - Barcelona - Evento 3.....	83
Figura 45: Escenario 1 - Barcelona - Evento 4.....	84
Figura 46: Escenario 1 - Barcelona - Evento 5.....	84
Figura 47: Agua retenida CV1-200mm - Granollers 1	86
Figura 48: Escenario 1 - Granollers - Evento 1.....	86
Figura 49: Escenario 1 - Granollers - Evento 2.....	87
Figura 50: Escenario 1 - Granollers - Evento 3.....	88
Figura 51: Escenario 1 - Granollers - Evento 4.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características generales de los sistemas intensivos y extensivos [14].....	17
Tabla 2: Valores recomendados para sustratos en cubiertas extensivas [18]	20
Tabla 3: Plantas más utilizadas en las cubiertas verdes en Barcelona. Listado más exhaustivo en la NTJ 11E y NTJ 11I.....	22
Tabla 4: Diferencias entre cubiertas inclinadas y planas.....	26
Tabla 5: Tareas de mantenimiento [14]	28
Tabla 6: Sobrecargas debidas al uso	28
Tabla 7: Sobrecargas según el tipo de cubierta verde.....	29
Tabla 8: Valores de transmitancias[23].....	32
Tabla 9: Costes potenciales asociados a la construcción de un tejado verde extensivo.....	36
Tabla 10: Ahorros potenciales asociados a la construcción de un tejado verde extensivo	36
Tabla 11: Ahorros potenciales asociados a la construcción de un tejado verde extensivo mediante incentivos	37
Tabla 12: Resumen del análisis coste-beneficio	37
Tabla 13: Costes aproximados de la implantación de cubiertas verdes[23].....	37
Tabla 14: Características de los paquetes de tejado verde.....	58
Tabla 15: Pesos de las capas de un paquete de tejado verde	59
Tabla 16: Peso de cada paquete de tejado verde.....	59
Tabla 17: Sobrecargas debidas al uso	59
Tabla 18: Características de la escorrentía para diferentes espesores de sustrato. T=2años	63
Tabla 19: Características de la escorrentía para diferentes espesores de sustrato. T=5años	64
Tabla 20: Características de la escorrentía para diferentes espesores de sustrato. T=10años.....	65
Tabla 21: Características de la escorrentía para diferentes valores de permeabilidad. T=10años.....	67
Tabla 22: Características de la escorrentía para diferentes valores de capacidad. T=10años	69
Tabla 23: Características de la escorrentía sin berma. T=10años	70
Tabla 24: ET0 Granollers	76
Tabla 25: ET0 Barcelona.....	77
Tabla 26: Coeficientes de cultivo [34].....	77
Tabla 27: Evapotranspiración real	78
Tabla 28: Escenario 1 – Barcelona.....	79
Tabla 29: Escenario 1 - Barcelona - Evento 1.....	81
Tabla 30: Escenario 1 - Barcelona - Evento 2.....	82
Tabla 31: Escenario 1 - Barcelona - Evento 3.....	83
Tabla 32: Escenario 1 - Barcelona - Evento 4.....	84
Tabla 33: Escenario 1 - Barcelona - Evento 5.....	85
Tabla 34: Escenario 1 – Granollers.....	85
Tabla 35: Escenario 1 - Granollers - Evento 1.....	87
Tabla 36: Escenario 1 - Granollers - Evento 2.....	87
Tabla 37: Escenario 1 - Granollers - Evento 3.....	88
Tabla 38: Escenario 1 - Granollers - Evento 4.....	89
Tabla 39: Escenario 2 – Barcelona.....	89

Tabla 40: Escenario 2 – Granollers.....90

Tabla 41: Resultados Cambio Climático - Barcelona.....91

Tabla 42: Resultados Cambio Climático – Granollers.....91

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge dentro del contexto de la asignatura de Trabajo Final de Máster del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Se enmarca en el ámbito de la hidrología urbana, concretamente dentro del drenaje urbano sostenible.

Según un informe de la OCDE [1], las perspectivas hacia 2050, si no cambian las políticas actuales, es que casi el 70% de la población mundial será urbana, lo que supone grandes retos. En lo que se refiere a la hidrología, este continuo crecimiento de las urbes supone una desnaturalización del medio y aumento de las áreas impermeables, lo que tiene como consecuencia mayores riesgos de inundaciones pluviales. Otros efectos negativos son la pérdida de biodiversidad, menor porcentaje de agua dulce, mayor contaminación del aire y otros problemas medioambientales. Surge así la necesidad de un nuevo modelo de crecimiento, donde los actores (administraciones públicas, privadas y ciudadanía) han de gestionar de manera equilibrada los recursos naturales.

Nace así el concepto de ciudad sostenible. Una ciudad sostenible será aquella que ofrece calidad de vida, reduce su impacto medioambiental y mantiene su crecimiento económico sin descuidar los aspectos sociales. Al fin y al cabo, el desarrollo sostenible debe entenderse como un equilibrio entre tres pilares básicos: aspecto social, económico y medioambiental.

En lo que concierne al drenaje urbano, se está produciendo un cambio de filosofía en cuanto a la concepción de la red de drenaje. Actualmente se apuesta por reducir la escorrentía en vez de recolectarla, para ello se apuesta por medidas que recuperen el comportamiento de las cuencas previo a la urbanización y re-naturalizar el ciclo integral del agua.

Las cubiertas verdes suponen una oportunidad para que las ciudades puedan beneficiarse de todos los efectos positivos que suponen tanto a nivel de usuario como a nivel de ciudad. Actualmente es una estrategia que está de moda entre arquitectos y urbanistas, ya que su implementación supone unos beneficios ambientales y sociales a partir de la restitución de la superficie edificada impermeable por superficies verdes. En este sentido, existe mucha literatura sobre estas nuevas técnicas en cuanto a su impacto positivo en temas paisajísticos y sociales, pero en lo referente a su aplicación como medidas de reducción de agua de escorrentía todavía queda mucho por estudiar. La gran mayoría de los estudios realizados hasta la fecha alaban los beneficios que suponen las cubiertas vegetales, con consideraciones de tipo cualitativo sobre la bondad de esta técnica.

Alemania es un país pionero en la implantación de tejados verdes con más de 20 años de experiencia, los países nórdicos también están muy adelantados en las nuevas técnicas de drenaje urbano sostenible y en Estados Unidos se están impulsando medidas y estudios enfocados a este cambio de concepción en el drenaje urbano. En España todavía queda mucho por hacer. Faltan estudios que analicen de manera no solo cualitativa, pero cuantitativa la viabilidad de implantar estas medidas en zonas de clima mediterráneo. No está claro que el balance final coste - beneficios sea positivo.

Hasta la fecha, el Ajuntament de Barcelona ha realizado estudios para analizar la posibilidad de implantar cubiertas verdes y ha lanzando medidas para promoverlas. Sin embargo estas medidas están enfocadas a aumentar la superficie de espacios verdes sin analizar el impacto que podrían tener en el drenaje urbano.

El presente trabajo pretende aportar datos cuantitativos del impacto que tendrían las cubiertas vegetales en el drenaje urbano, los beneficios que supondría y describir el comportamiento hidrológico que tendrían en un clima tan especial como es el clima mediterráneo. También se realizará una recopilación del estado del arte de esta materia así como un análisis de su potencial a largo plazo y su viabilidad.

1.1.OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster es proponer diferentes diseños de paquetes de tejado verde para un edificio en el área metropolitana de Barcelona.

A continuación se enumeran los objetivos específicos que se persiguen con este trabajo:

- Conocer las diferencias entre la hidrología tradicional y la hidrología urbana y la incidencia de la urbanización en las redes de drenaje urbano. En concreto, conocer en profundidad los problemas de inundación en el litoral mediterráneo y efectos de la urbanización de las cuencas naturales.
- Profundizar en el conocimiento de las nuevas técnicas de drenaje urbano sostenible y el cambio de filosofía en la concepción y diseño de dichas redes.
- Realizar una investigación previa sobre qué son los tejados verdes y sus aspectos generales, qué beneficios tienen y qué consideraciones técnicas implican. Hacer un breve repaso de las experiencias internacionales y nacionales así como conocer en qué dirección avanzan estas nuevas técnicas.
- Introducir el software SWMM5 como herramienta para realizar modelos de redes de drenaje y conocer el nuevo paquete de utilidades para modelar sistemas de drenaje urbano.
- Analizar las características hidrológicas de la zona de estudio como pluviometría y evapotranspiración, concretamente, las particularidades del clima Mediterráneo.
- Analizar el comportamiento hidrológico de una cubierta verde durante eventos de tormenta extremos y realizar un análisis de sensibilidad de las propiedades de un tejado verde.
- Analizar el comportamiento hidrológico de diferentes paquetes de tejado verde con diferentes espesores en una simulación continua de un año pluviométrico estándar en Barcelona y Granollers.
- Proponer las características más óptimas que debe tener un paquete de tejado verde que se desee instalar en Barcelona en función de su comportamiento hidrológico y las ventajas e inconvenientes que pueda suponer en relación a una cubierta convencional

1.2.ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura del documento se divide en diez apartados en los que se introducen las diferencias entre hidrología urbana e hidrología tradicional y el cambio de filosofía hacia las nuevas técnicas de drenaje urbano sostenible. Se hace un repaso de qué son los tejados verdes, los aspectos generales de éstos, los aspectos técnicos que implican, sus beneficios y se muestran algunas experiencias a nivel nacional e internacional.

Los siguientes apartados se centran en la modelización de las cubiertas vegetales. Se realiza una descripción al software utilizado, el SWMM5. Seguidamente se hace una introducción al caso de estudio, características de la zona y definición de los paquetes de tejado verde analizados. Se ha realizado un análisis del comportamiento de estos paquetes frente a eventos de lluvia aislados y su comportamiento en varias simulaciones continuas de un año pluviométrico estándar de Barcelona y Granollers.

Finalmente se resumen las conclusiones que se han podido extraer del trabajo y se muestran las fuentes consultadas.

2. HIDROLOGÍA URBANA

La hidrología urbana es una especialidad de la hidrología que estudia el ciclo hidrológico del agua en el medio urbano. Se diferencia de la hidrología tradicional por las alteraciones que el ser humano produce en el ciclo del agua por el proceso del urbanismo.

El ciclo hidrológico o ciclo del agua, describe el movimiento continuo y cíclico del agua entre las distintas partes de la hidrosfera. El agua puede, o no, cambiar su estado y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años pero la cantidad total del planeta permanece constante. En este ciclo intervienen múltiples procesos como: precipitación, evapotranspiración, condensación, infiltración, escorrentía, circulación subterránea, etc.

La urbanización, al fin y al cabo es un proceso de transformación del medio natural, por lo que altera de forma notable las características morfológicas y físicas el entorno, teniendo un impacto en el ciclo natural del agua. El mayor impacto que tiene la urbanización es que crea una capa impermeable sobre la cuenca natural, sustituyendo el terreno natural por asfalto y hormigón y modificando la dinámica natural del medio. Concretamente los procesos que resultan alterados son la infiltración, evaporación y escorrentía. Las consecuencias que tiene son una disminución de la capacidad de desagüe de la red de drenaje de aguas pluviales, incremento de los caudales extremos y aumento del volumen de escorrentía.

Este fenómeno de rápida urbanización está muy presente en diferentes zonas de la Península Ibérica, y en particular en todo el litoral mediterráneo, donde, además de una urbanización intensiva y no respetuosa con la hidrología, la pluviometría se caracteriza por lluvias torrenciales de elevada intensidad [2].

2.1. INCIDENCIA DE LA URBANIZACIÓN EN EL DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES

Es conocida la tendencia al desplazamiento de la población desde zonas rurales hacia zonas urbanas. En la actualidad casi el 50% de la población mundial vive en zonas urbanas, habiéndose incrementado en más de un 80% en los últimos 20 años. En España entre 1920 y 1981 el total de población en capitales de provincia se multiplicó por 4.5 y tenemos más del 75% de nuestros habitantes residiendo en zonas urbanas [3].

En el área metropolitana de Barcelona (AMB), el porcentaje de suelo ocupado ha aumentado en los últimos años. Se ha pasado de un 36.41% de suelo consolidado en 1990 a un 44.7%, lo que supone un aumento de la impermeabilidad del territorio.

Actualmente cada vecino de Barcelona cuenta con unos siete metros cuadrados de espacios verdes, una proporción muy lejos de los registros recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que rondan el doble. El actual gobierno de la ciudad pretende que cada persona que viva en la ciudad pueda disponer de hasta un metro cuadrado más de zona verde en el 2030 [4].

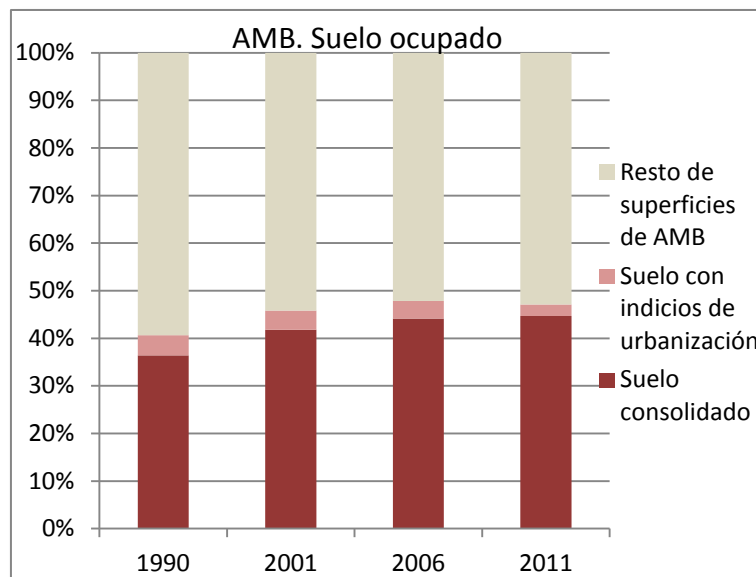


Figura 1: Evolución de la ocupación del suelo [5]

La urbanización de una cuenca modifica su respuesta hidrológica frente a una determinada lluvia. La urbanización conlleva la alteración del sistema de drenaje natural y un incremento de las zonas impermeables en superficie, por lo que las redes de drenaje se diseñan con el fin de drenar lo más eficiente y rápido posible el agua precipitada en el área urbanizada. Como se ha mencionado, esta dinámica afecta a la hidrología de la cuenca y muy especialmente a las zonas situadas más bajas de la ciudad. La urbanización que se sitúa aguas arriba modifica el hidrograma que reciben estas zonas de tal forma que se incrementan el volumen de escorrentía y el caudal máximo. Así mismo, es menor el tiempo que transcurre entre el inicio de la escorrentía provocada por la lluvia y el máximo caudal: disminuye el tiempo de concentración. Todo ello conlleva a que las zonas que quedan aguas abajo estén afectada con mayor frecuencia por caudales que pueden crear problemas por inundación que serán más importantes cuanto menores sean las pendientes en las zonas bajas.

La disminución del tiempo de respuesta es debida, a la mayor velocidad del agua en una cuenca urbana que en una cuenca natural. Evidentemente, en este aumento de velocidad juega un papel importante la red de colectores. Tal es el efecto de la transformación de una cuenca rural a urbana que en distintas cuencas experimentales el incremento de caudal pico se puede superar entre 8 y 10 veces y el volumen de escorrentía de 3 a 8 veces [6].

El proceso de transformación lluvia-escorrentía en zona urbana es diferente al que ocurre en cuencas naturales. Las zonas urbanas se caracterizan por la gran superficie impermeable presente y la existencia de una red de drenaje artificial con puntos localizados de entrada de agua en la red, causando una serie de puntos del problemáticos a resolver. En primer lugar a la propia definición de la cuenca, que si bien en espacios naturales se realiza atendiendo al relieve superficial, en zona urbana debe tener en cuenta esto, pero a la vez la presencia de la red de drenaje. No es infrecuente que el drenaje artificial no se realice en las mismas direcciones o sentidos que la escorrentía superficial. La capacidad de los elementos de captación de esa escorrentía superficial puede ser otro factor que influya en la definición del concepto de cuenca urbana y sus limitaciones, al

permitir la transferencia de caudales superficiales entre las teóricas cuencas, modificando las superficies de aportación respectivas de cada colector y condicionando el esquema de caudales de cálculo final de la red.

La escala espacial de estudio en las cuencas urbanas suele ser mucho más pequeña que la de un estudio hidrológico de cuencas naturales. La unidad de medida será la Hectárea, frente al Kilómetro cuadrado. Por lo que respecta a los tiempos totales de estudio e intervalos de análisis, será también necesariamente mucho menor. Frente al valor habitual de los estudios clásicos hidrológicos de muchas horas o incluso días para los tiempos de estudio, e intervalos de tiempo de 1 hora o a veces más. En cuencas urbanas la duración total del tiempo de estudio será de pocas horas, con intervalos de tiempo del orden de los minutos.

Un efecto derivado también del medio urbano, es la elevada generación de escorrentía reflejada en términos de caudal específico (caudal punta/superficie de la cuenca) de la zona urbana. Como orden de magnitud se puede indicar que en poblaciones dentro del área metropolitana de Barcelona se evalúan para lluvias de periodo de retorno de 10 años, similares caudales específicos a los obtenidos en cuencas naturales para lluvias de 500 años de periodo de retorno.

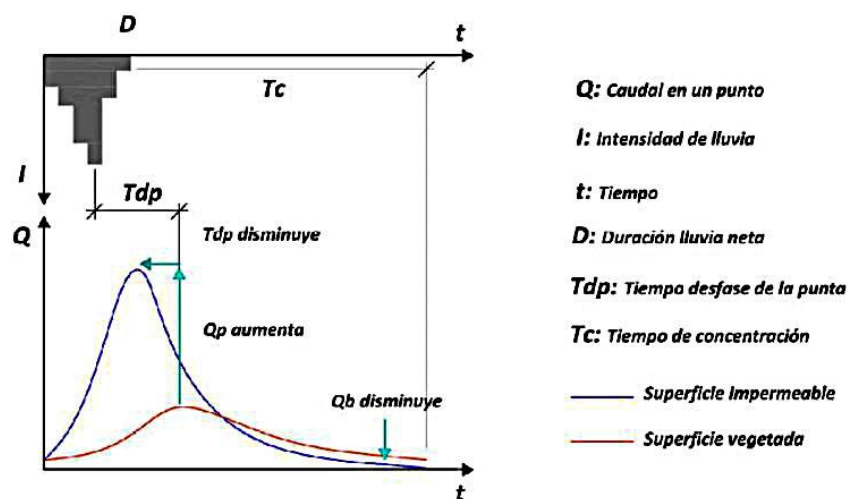


Figura 2: efectos sobre el hidrograma de una cuenca natural a una urbana

En la figura anterior se muestra el impacto típico de la urbanización de una cuenca. El hidrograma de la situación tras el desarrollo se diferencia por el hidrograma de la cuenca natural en los siguientes puntos

- El volumen total de escorrentía es mayor.
- El proceso de concentración de caudal ocurre más rápido.
- El caudal punta es mayor.
- El tiempo de concentración se acorta.
- La calidad del agua de escorrentía se deteriora.

2.2. EL CLIMA MEDITERRÁNEO

El clima de la costa mediterránea se clasifica como *Csa* en la escala de Köppen. La denominación de clima “C” corresponde a un clima templado caracterizado porque la

temperatura media del mes más frío es menor de 18°C y superior a -3°C y la del mes más cálido superior a 10°C. En la segunda clasificación la “s” hace referencia a un verano seco por el que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más altas. La estación lluviosa no tiene por qué ser el invierno. Por último, la letra “a” se refiere a zonas con veranos muy calurosos, pues superan los 22°C de media en el mes más cálido.

Aparece un gran contraste de precipitaciones y sequedad de unos años a otros aun refiriéndonos a un mismo mes, y esta disparidad se acentúa a medida que nos acercamos al mar. Se resumen a continuación las principales características de los eventos de lluvia extrema que sufre el litoral mediterráneo, en base a los estudios sobre la materia de Martin Vide [7].

2.2.1. VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL

La variabilidad espacial y temporal del clima mediterráneo es tal que se pueden dar algunas zonas que presentan desviaciones positivas respecto a los promedios mientras que en otras quedan por debajo de la media. En Cataluña el coeficiente de variación anual presenta valores superiores al 20% en casi todo su territorio, incluso se puede llegar a alcanzar el 40%. Siendo el coeficiente de variación anual la relación entre el tamaño de la media de la precipitación anual de una zona y la variabilidad de la variable, en este caso la precipitación.

No solo en términos totales se presenta la disparidad interanual, sino que incluso el orden cronológico de aparición de los grandes eventos difiere de un año a otro.

2.2.2. IRREGULARIDAD DIARIA Y CONTRIBUCIÓN AL TOTAL ANUAL

Además de las irregularidades en términos anuales, la irregularidad en términos diarios es remarcable. Los eventos de unos pocos días al año pueden llegar a representar un gran porcentaje del total de la lluvia anual.

En Barcelona, solo el 25% de los días más lluviosos aporta más del 70% de la precipitación anual e incluso puede que alrededor del 50% de la precipitación acumulada anual se reparte en 2-3 episodios extremos.

2.2.3. MARCADA ESTACIONALIDAD

A pesar de la incertidumbre a la hora de prever este tipo de eventos en el espacio y en el tiempo, el otoño sigue siendo la estación que concentra gran parte de las precipitaciones torrenciales anuales; aproximadamente un 75%.

2.2.4. ESCASA DURACIÓN, PERSISTENCIA Y ALTA INTENSIDAD

La probabilidad de que un día muy lluvioso venga seguido de otro es muy baja. Menos probable es que se den dos días consecutivos de lluvias con intensidades importantes. Esto se debe a que las lluvias torrenciales del Mediterráneo occidental son habitualmente de naturaleza convectiva, cuya fase de madurez es normalmente menor a 30 minutos. Las mismas cantidades que en nuestro clima caen en horas o minutos en climas atlánticos tardan varios días en acumularse. En gran parte del territorio de Cataluña se supera el umbral de los 100 mm/día para un periodo de retorno de tan solo 10 años, dándose casos puntuales que alcanzan los 400 mm en 24 horas. Las intensidades horarias y sub-horarias

son aún más llamativas, registrándose en Barcelona aproximadamente 10 eventos al año por encima de 1 mm/min, llegando alguno de ellos hasta los 5 mm/min.

2.2.5. DIFICULTAD DE PREVISIÓN

La predicción de la pluviometría en el litoral Mediterráneo es muy complicada y por tanto resulta complejo anticiparse y definir un año estándar. El mapa pluviométrico de la península es muy complejo, incluso a pequeña escala es difícil generalizar las características climáticas.

2.3. CONSECUENCIAS DE LAS INUNDACIONES

Los riesgos naturales asociados al agua son los más generalizados y los que de manera más recurrente se materializan en forma de desastres en España hasta el punto que más de la mitad del total de expedientes tramitados por el Consorcio de Compensación de Seguros entre 1971 y 1999 y el 74.8% de las cuantías pagadas durante el mismo periodo a través de dicho organismo corresponden a inundaciones [8]. Las inundaciones en todas sus formas causan graves problemas en las zonas urbanas de todo el mundo.

Muchos de estos desastres son causados por eventos climáticos extremos a gran escala, eventos de lluvias que hacen que los ríos se desborden y se inunden las riberas (inundaciones fluviales) y eventos de lluvia que tienen como consecuencia un gran oleaje en zonas costeras que provocan inundaciones. Las inundaciones pluviales, también llamadas inundaciones de aguas superficiales, o inundaciones causadas por precipitaciones intensas, son causadas directamente por las precipitaciones que aún no han alcanzado los cursos de agua o los sistemas de drenaje, o cuando el drenaje subterráneo (natural o “artificial”) es insuficiente.. Normalmente estos eventos se caracterizan por una aparición repentina y altas intensidades.

Las inundaciones pluviales en zonas urbanas tienen una gran repercusión entre los ciudadanos, suponen interrupción de servicios y cuantiosos daños materiales dado el elevado valor de los bienes que se almacenan en cualquier entorno urbano, y en ocasiones también de tipo humano [9]. Las inundaciones en medio urbano, sean del tipo que sean, se caracterizan por un alto grado de peligrosidad por la alta vulnerabilidad del territorio. Está claro que hay que diferenciar, por cada tipo de inundación, el análisis del riesgo hidráulico en función de las características del flujo. De hecho en caso de inundaciones producidas por desbordamiento de un río, el flujo suele caracterizarse por tener altos calados (del orden de los metros) y bajas velocidades (hasta 1-2 metros por segundo), mientras en caso de inundaciones producidas por eventos de lluvia extremos, las inundaciones son mucho más rápidas por efecto de las superficies poco rugosas y el alto grado de impermeabilidad con un flujo que circula descontrolado por las calles urbanas de nuestras ciudades con calado de pocos centímetros pero con velocidades hasta de 3-4 metros por segundo.

Hoy en día es habitual definir el nivel de seguridad de una calle durante un suceso de lluvia con un determinado periodo de retorno, a través de los valores máximos de dos parámetros significativos del flujo: calado y velocidad. La ciudad de Barcelona diseña los sistemas de captación de todo el término municipal sobre la base de dos criterios de riesgo muy restrictivos asociados a la lluvia de proyecto con periodo de retorno de 10 años: calado máximo $y_{\max} < 0.06$ m y velocidad máxima $V_{\max} < 1.5$ m/s.

3. LA RESILENCIA Y EL DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Uno de los grandes retos del siglo XXI es alcanzar un desarrollo sostenible, y que esto se alcance dependerá en gran medida de las medidas que se tomen en las zonas urbanas del mundo. Con 50% de la población mundial viviendo en ciudades y con una proyección de crecimiento sustancial de la población urbana para las próximas décadas, existe la necesidad de contar con nuevas herramientas y enfoques que fortalezcan gobiernos locales y ciudadanos para una mejor protección de los recursos humanos, económicos y naturales de nuestros pueblos y ciudades. La resiliencia alude a la capacidad de los asentamientos humanos para resistir y recuperarse rápidamente de cualquier peligro plausible. La resiliencia no sólo contempla la reducción de riesgos y daños de catástrofes (como pérdidas humanas y bienes materiales), sino la capacidad de volver rápidamente a la situación estable anterior [10].

A lo largo de la historia los asentamientos urbanos han estado estrechamente relacionados con el agua como necesidad para el desarrollo de la vida. Actualmente no solo dependemos del agua para el consumo, producir recursos o recreación, el agua forma parte de la identidad de un lugar. Sin embargo, la relación entre los lugares donde vivimos y los recursos hídricos de los que dependemos a menudo no se prioriza a la hora de planificar el desarrollo de las ciudades. La escasez de agua, las inundaciones y la contaminación son signos de estrés ambiental de las zonas urbanizadas, donde el ciclo del agua se ha convertido en un riesgo más que en una oportunidad.

La desnaturalización e impermeabilización de la superficie en las ciudades hace que el ciclo natural del agua se vea alterado de una forma muy importante, convirtiendo las ciudades en zonas cuasi-desérticas. Además de los problemas de inundación y contaminación difusa que ello conlleva también tienen otros efectos negativos como la pérdida de riqueza visual, se impide la recarga de acuíferos y se genera el efecto de isla de calor, efectos que suponen un contra-servicio para las personas. Por esta razón es importante que la planificación y desarrollo urbanístico sea sostenible.

El desarrollo sostenible tiene tres pilares básicos que son: aspectos económicos, sociales y medioambientales; de tal forma que los tres puedan coexistir simultáneamente. Un aspecto vital del desarrollo de una ciudad es la red de drenaje urbano y para que ésta esté enfocada hacia la sostenibilidad se deben plantear nuevos enfoques en el diseño del drenaje urbano. Este nuevo enfoque debe considerar en el diseño de las nuevas redes los aspectos relacionados con la cantidad de agua, su calidad y el servicio que ofrece a la sociedad [11].

La filosofía de los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) es maximizar los beneficios que supone y minimizar los impactos negativos que supone la escorrentía superficial en las áreas urbanas. La estrategia de las SUDS engloba los criterios de cantidad, calidad y servicio para dar lugar a un conjunto de técnicas que puedan proporcionar una solución adecuada y duradera a los problemas planteados.

3.1.LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE CONVENCIONALES

El funcionamiento de los sistemas de drenaje urbano convencionales es de sobra conocido, ya que es el mismo que se aplica en todas las ciudades desde que aparecieron las primeras

redes de alcantarillado en las ciudades europeas durante el siglo XIX, sin contar las redes de alcantarillado de la época romana.

La solución tradicional para evitar las inundaciones en áreas urbanizadas consiste en sustituir de forma artificial el drenaje de una cuenca natural. Para evitar la acumulación de agua en superficies impermeables, la escorrentía superficial es recolectada mediante una serie de imbornales situados a lo largo de las calles que transfieren el agua de lluvia hacia la red de colectores soterrada. Los colectores evacuan el agua hacia el medio directamente o hacia las plantas de tratamiento. La infraestructura se diseña para un caudal punta asociado a un periodo de retorno determinado según el nivel de protección impuesto por la regulación local.

El drenaje urbano actual presenta problemas que se pueden clasificar en tres categorías: cantidad, calidad y servicio. Los problemas de cantidad son los más perceptibles ya que se traducen en inundaciones con eventuales daños materiales y personales. Por otra parte, los problemas de calidad de las aguas no son siempre detectables a simple vista y sus efectos se manifiestan en la flora y fauna de los medios receptores, pero también en la salud pública en el caso de las aguas de baño. El último aspecto, está ligado a la interrupción de otros servicios urbanos que pueden verse afectados debido a un mal funcionamiento del sistema de drenaje urbano (tráfico, playas, etc.).

Las soluciones que se han propuesto han sido tradicionalmente enfocadas a los temas de cantidad y continuidad de los servicios, dejando de lado la calidad. Las alternativas planteadas se han centrado en la construcción de grandes tanques de tormenta y aumento de los diámetros de diseño de las tuberías. Estas soluciones muchas veces resultan muy costosas y difíciles de aplicar, además no siempre tienen una repercusión positiva y unos beneficios sociales y ambientales como si pueden tenerlos las soluciones basadas en la naturaleza.

Por estas razones es necesario un análisis holístico del problema global, contemplando todos los aspectos del ciclo hidrológico, todos los actores implicados y todos los posibles beneficios que las medidas planteadas en el ámbito del drenaje urbano pueden aportar..

3.2.INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible se conocen con diferentes nomenclaturas y denominaciones en los diferentes países donde son empleados. Se ha considerado conveniente hacer una recopilación de las diferentes denominaciones que se le da a este tipo de sistemas de drenaje alrededor del mundo para evitar posibles confusiones o interpretaciones erróneas del mensaje que se desea transmitir. A continuación, se enumeran algunas de las denominaciones que se pueden encontrar [12]:

- SUDS \equiv *Sustainable Urban Drainage Systems*. Es el término utilizado en el Reino Unido y se utilizó por primera vez en 1997. En la actualidad el Manual de SuDS del CIRIA es uno de los más consultados y está en constante actualización.
- BMPs \equiv *Best Management Practices*. Este término se utiliza en Norte América para referirse a las medidas de prevención de la contaminación proveniente de las aguas residuales. Este término nace en 1972.

- LID \equiv *Low Impact Development*. Este término se utiliza en América del Norte y Nueva Zelanda. Esta denominación nace en 1977 para referirse a distintas prácticas relacionadas con la gestión de aguas pluviales.
- WSUD \equiv *Water Sensitive Urban Design*. Este término se comenzó a utilizar en Australia a principios de los años 90.
- Otros términos como: Diseño urbano Sensible al Agua, MPC \equiv *Mejores Prácticas de Control*, BPAs \equiv *Buenas Prácticas Ambientales*, infraestructuras verdes o *Green Infrastructure*, SCMs \equiv *Stormwater Control Measures*, ATs \equiv *Alternative Techniques*.

En España todavía no está muy clara la denominación más acertada para referirnos a este tipo de sistemas de drenaje. Algunos grupos de investigación se han decantado por el término “Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible”, SUDS, ya que las siglas coinciden con la denominación utilizada en el Reino Unido y ampliamente extendida. También se utiliza en España el término TEDUS, técnicas de drenaje urbano sostenible. En este trabajo se hablará de técnicas LID, ya que es la denominación que se utiliza en el software SWMM5 con el que se ha trabajado, además es un término que engloba tanto la gestión de aguas pluviales como la del ciclo hidrológico de una ciudad.

Como ya se ha adelantado, los beneficios al emplear las técnicas LID pueden ser de dos tipos en cuanto al campo del drenaje urbano: el control de la cantidad de agua y el control de la contaminación. También suponen otros beneficios en relación al medioambiente y calidad de vida en las ciudades como pueden ser: un aumento de la biodiversidad, aumento de zonas verdes en las ciudades y haciéndolas mejores sitios para vivir, reducen el efecto del cambio climático y reducen gases de efecto invernadero.

Al controlar la cantidad de agua se reducen las puntas de caudal causadas por la impermeabilización del terreno producida por la urbanización. Esta reducción de puntas de caudal permite reducir, a su vez, posibles problemas de capacidad hidráulica de los sistemas de saneamiento, y en última instancia, evitar las inundaciones provocadas por la incapacidad del sistema tradicional.

Por otra parte, el control de la contaminación permite la reducción de la contaminación vertida mediante los procesos de depuración física, química y biológica que se realiza en estos dispositivos. De este modo, también se mejoran las características del caudal que llega a la EDAR y se puede mejorar la calidad del agua pluvial para su valorización en las cuencas urbanas. En definitiva, la incorporación de las técnicas LID en la concepción de los nuevos sistemas de saneamiento y drenaje reduce el impacto producido por la urbanización en el entorno: se incrementan las tasas de infiltración y la recarga de los recursos subterráneos, se disminuye el impacto morfológico de los vertidos y la erosión de los cauces naturales y se reduce la carga de contaminación movilizad hacia las masas acuáticas receptoras [13].

En definitiva, estas nuevas técnicas no son simplemente nuevas tecnologías para mejorar el actual sistema de drenaje tradicional, sino que suponen un cambio de filosofía, una nueva visión de concepción de las infraestructuras de drenaje en las ciudades. Se trata de transformar los problemas en oportunidades, volver a considerar el agua de lluvia como un recurso y tener en cuenta lo que la sostenibilidad implica: convivencia entre los

aspectos sociales, económicos y medioambientales. A continuación se resumen los objetivos de las técnicas de drenaje sostenible según el manual del CIRIA:

- Proteger a las personas y las propiedades del aumento de riesgo por inundación como resultado de la urbanización.
- Proteger la calidad del agua infiltrada y de escorrentía superficial.
- Proteger los caudales naturales de los ríos y lagos.
- Mejorar la humedad del suelo y aumentar los niveles del nivel freático.
- Fomentar una mayor biodiversidad y la vinculación de hábitats.
- Crear lugares atractivos donde las personas quieran vivir, trabajar y jugar mediante la integración del agua y los espacios verdes con la urbanización de las ciudades.
- Hacer consciente a las personas del ciclo del agua, cómo se tratan las aguas de lluvia y cómo funciona la red de drenaje.
- Fomentar un desarrollo con mayor capacidad de hacer frente al cambio climático.
- Fomentar una infraestructura rentable que utiliza menos recursos naturales y tiene una huella de carbono de vida útil inferior al drenaje convencional.

3.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS LID

Las técnicas de drenaje sostenible pueden clasificarse desde diferentes puntos de vista. Una primera clasificación podría hacerse según si las medidas son estructurales o no estructurales. Las primeras serán aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contengan algún elemento constructivo o que supongan la adopción de criterios urbanísticos. Las no estructurales serán aquellas que no precisan una actuación directa sobre la red ni la construcción de nueva infraestructura, como pueden ser las campañas de concienciación.

Una clasificación muy extendida es la que cataloga las técnicas LID en función de su emplazamiento en el sistema de saneamiento y drenaje urbano. La gestión del agua de lluvia debe gestionarse a diferentes escalas para potenciar al máximo sus beneficios:

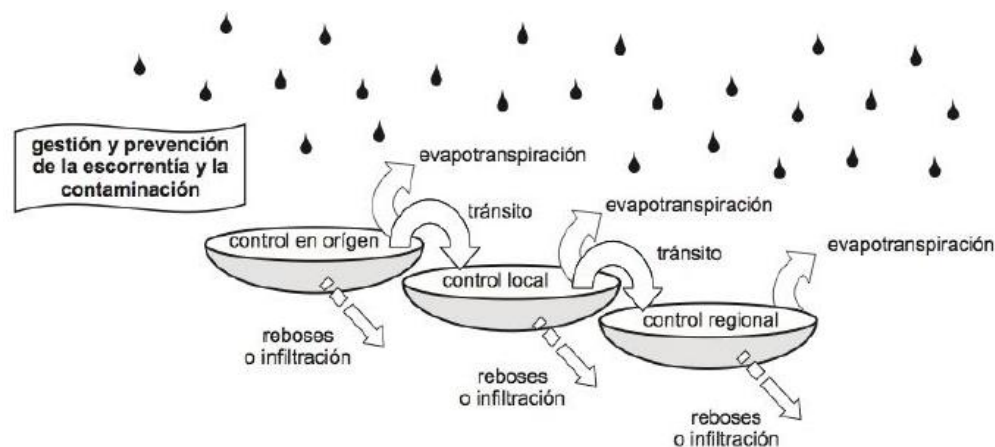


Figura 3: Jerarquización de la gestión de aguas pluviales [13]

3.3.1. PREVENCIÓN

La secuencia de la gestión empieza por la prevención a través de medidas no estructurales como medidas legislativas que promuevan y motiven las técnicas LID, campañas de concienciación ciudadana en cuestiones de limpieza de las calles, reducción de las

emisiones y aprovechamiento del agua. Estas medidas son el primer paso para optimizar el sistema de drenaje de una ciudad de tal manera que se ahorren esfuerzos innecesarios.

3.3.2. MEDIDAS EN ORIGEN

Las técnicas de control de entradas en origen se diseñan para gestionar las aguas de escorrentía en el punto donde se produce la lluvia. El control de entradas consiste en proporcionar un volumen de retención en superficies o lugares especialmente preparados. El volumen de agua retenida se puede derivar posteriormente a un sistema de control local y se puede almacenar y tratar para su utilización o valoración, tanto en usos urbanos como para su infiltración. Estas medidas permiten minimizar los efectos de la impermeabilización de las cuencas, tanto en caudales y volúmenes de agua como en contaminación. El control en origen es el más adecuado en áreas urbanizadas en las que el espacio disponible es escaso ya que se ubican normalmente en propiedades privadas.

Algunas de estas técnicas son: pozos de infiltración, zanjas de infiltración, tejados verdes, pavimentos porosos o pavimentos modulares

3.3.3. CONTROL EN VERTIDO Y TRANSPORTE

Son las aplicadas a elementos de la red de alcantarillado, es decir, las que se emplean sobre la escorrentía una vez generada de forma previa a su vertido al medio.

Los sistemas de control en el transporte tienen como misión transportar el agua hacia otros sistemas de tratamiento mayor o a los lugares de vertido correspondientes aportando en el camino una serie de ventajas. Entre los principales sistemas de transporte destacan: drenes filtrantes, cunetas verdes, y las franjas filtrantes. Se trata por de sistemas de tipo lineal.

3.3.4. CONTROL REGIONAL

Las técnicas para el control regional son instalaciones de retención o detención a escala de sub-cuenca y pueden emplearse en tramos altos, medios o bajos de las redes de aguas pluviales en los sistemas separativos donde el área tributaria es apreciable. Las técnicas para el control regional pueden adoptar las siguientes formas: estanques de detención (secos), estanques de retención (húmedos), depósito de hormigón subterráneo, humedales artificiales, bandas y zanjas de césped, sistemas de filtración en lecho de arena. En áreas urbanas muy consolidadas es complicado disponer de espacio suficiente para construir este tipo de sistemas de tratamiento extensivos.

4. TEJADOS VERDES

4.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Las cubiertas o tejados verdes son un elemento importante y en crecimiento dentro de las infraestructuras verdes en las ciudades. La bibliografía existente demuestra que la implantación de cubiertas verdes en diferentes países a lo largo del tiempo reporta beneficios. Se pueden encontrar ejemplos de tejados verdes a lo largo de la historia, algunos de los primeros incluyen los jardines colgantes de Babilonia en el siglo V, los zigurats en Mesopotamia o la arquitectura Romana que ya contemplaban el uso de cubiertas verdes. Estos elementos también han sido muy populares en la arquitectura tradicional de los países nórdicos. Durante el siglo XX el arquitecto Le Corbusier incluyó las cubiertas verdes en algunos de sus proyectos [14].



Figura 4: de izquierda a derecha (1) jardines colgantes de Babilonia, (2) zigurats en Mesopotamia, (3) Couvert de la Tour, Le Corbusier (4) ejemplo de arquitectura típica escandinava.

En los años 70, se llevó a cabo una implementación intensiva de los tejados verdes en Alemania, pero también en países como Francia y Suecia esta técnica ganó popularidad durante esa misma década.

Hoy en día es una técnica en que está consolidándose ya que se considera una solución para resolver el problema de falta de espacios verdes en las aglomeraciones urbanas. Se ha escrito mucho sobre este tema, pero todavía existe una falta de conocimientos técnicos y sobre todo en cuanto a su rendimiento y viabilidad en zonas de climas secos.

4.2. ASPECTOS GENERALES Y TIPOS

Una cubierta verde o ecológica, también llamada tejado verde, es una técnica de construcción mediante la cual la cubierta o azotea de un edificio es adaptada parcial o totalmente para el crecimiento de vegetación. No se refiere a jardines en macetas, sino a tecnologías utilizadas en los tejados para que cumplan una función ecológica. El término de cubierta verde también es compatible con el uso de otras tecnologías tales como paneles solares fotovoltaicos o módulos fotovoltaicos.

Esta tecnología imita a la naturaleza mediante un sistema de construcción multicapa, es decir, consiste en superponer capas en las cubiertas de los edificios con el fin de conseguir simular un suelo apto para el crecimiento de determinadas especies vegetales así como mejorar las propiedades respecto a las cubiertas convencionales. Los elementos que integran las cubiertas verdes son comunes independientemente del tipo de cubierta, espesor del sustrato o especies vegetales. Las capas que forman la cubierta vegetal son [15]:

- Protección de la impermeabilización → para que no se dañe la lámina impermeable es importante colocar una capa de protección. Dependiendo del acabado se recomienda

colocar un elemento u otro: pavimento de mortero sobre la impermeabilización, pavimento flotante sobre la impermeabilización, cubierta verde o huerto sobre la impermeabilización.

- Lámina drenante de la cubierta → esta capa cumple la función de drenar, ventilar, retener el agua y proteger la impermeabilización. Dependiendo de la pendiente, tipo de vegetación y el uso que se le dé a la cubierta el tipo de placa drenante cambiará.
- Filtros → la capa filtrante tiene como misión evitar el paso de las partículas finas del sustrato hacia la capa drenante. Es clave el uso de geotextiles diseñados específicamente para cumplir esta función.
- Sustrato → esta capa es capital para el buen desarrollo de la vegetación y está diseñada específicamente para esta función. El sustrato debe cumplir los siguientes requisitos: permitir la función de drenaje, respetar el diseño de cargas del edificio, cumplir con la función de protección requerida, ser adecuado al tipo de vegetación, garantizar que la vegetación se mantenga de forma permanente y limitar los costes de mantenimiento.
- Vegetación → se priorizan especies que se adapten fácilmente a condiciones extremas, con resistencia a cambios bruscos de temperatura, resistentes al viento, resistentes a afecciones de enfermedades y con poco requerimiento de nutrientes, que no sean alérgenos y con poco desarrollo radicular.

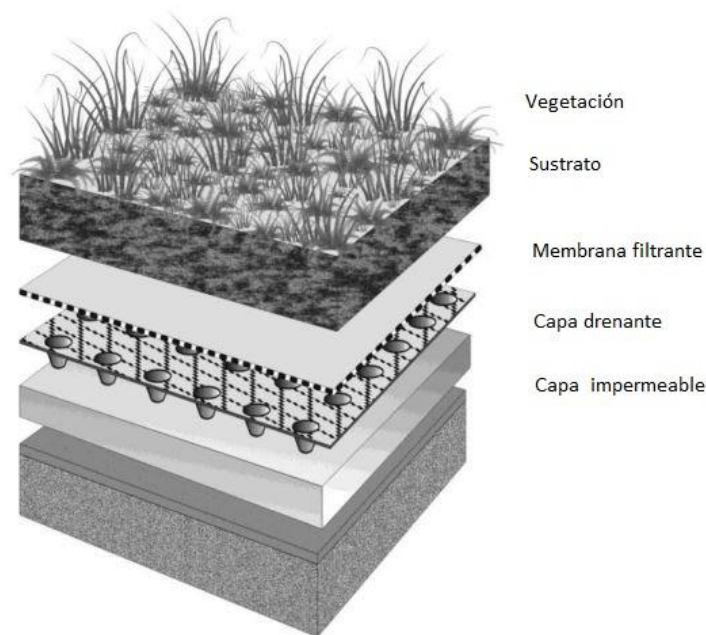


Figura 5: Capas de un paquete de tejado verde [16]

Tradicionalmente las cubiertas verdes se han clasificado en extensivas e intensivas, aunque algunos autores también incluyen el tipo de semi-intensivo. A continuación se describen los dos tipos de cubiertas verdes [17]:

- **Sistemas extensivos:** estos sistemas cubren toda el área del tejado con plantas resistentes, de crecimiento lento, resistentes a la sequía y que requieren poco mantenimiento (por ejemplo sedums, hierbas o plantas suculentas). Solamente se accede a estas cubiertas para las tareas de mantenimiento y pueden ser tanto planas como con pendiente. Normalmente los espesores de este tipo de cubiertas

van desde los 20 hasta los 200 milímetros y pueden admitir sistemas uni-capa (consistente en una sola capa de sustrato y se deja que el medio filtre libremente) o sistemas multicapa, que son los más extendidos. Se caracterizan por ser ligeros, bajo coste de mantenimiento y pueden implantarse casi en cualquier sitio sin añadir un gran coste de construcción. Son adecuados para implementarlos en construcciones existentes.

- **Sistemas intensivos:** estos sistemas son más complejos y se diseñan para que puedan promover el uso y disfrute de la cubierta. Las especies vegetales que se plantan en este tipo de cubiertas son mucho más variadas, desde hierbas hasta árboles. También pueden incluir otros sistemas de almacenamiento de agua para uso de riego. Requieren un mantenimiento regular y deben ser de fácil acceso ya que normalmente son de acceso público. Los espesores de este tipo de cubiertas son mayores a 200 milímetros, por lo que las cargas sobre el edificio serán mayores.

Las cubiertas con espesores entre 100 – 200mm tienden a denominarse semi-intensivas ya que pueden incluir características de ambos tipos. En la siguiente tabla se muestra de forma resumida las características de cada tipo de cubierta y se dan unos valores generales de peso y capacidad de retención de agua, aunque estos aspectos se estudiarán con más detalle en los apartados siguientes.

	Sistemas extensivos	Sistemas intensivos
Espesor	20 - 200 mm	> 200mm
Peso saturado	60 - 150 kg/m ²	> 300 kg/m ² es probable que necesiten reforzar la estructura
Capacidad de retención de agua	25 - 65 l/m ²	113 l/m ²
Plantas	Musgos, sedums, sculentas y algunas gramíneas	Plantas perennes, arbustos, árboles e incluso agricultura
Acceso	Normalmente no son accesibles	Accesibles como espacios comunes
Riego	Normalmente no es necesario	Ocasional o frecuente
Mantenimiento	Mínimo o ninguno	Regular
Coste	Bajo	Alto

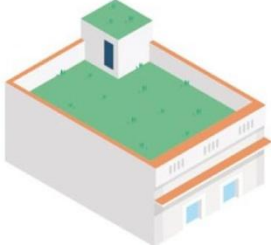

Ventajas y desventajas	<p><u>Ventajas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Peso ligero – Apto para grandes áreas – Apto para tejados con pendientes de 0 – 30° – Bajo manteniendo y alta vida útil – Normalmente no requieren riego – Adecuado para aplicarlo en edificios existentes – Relativamente más barato <p><u>Desventajas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Las plantas están sometidas a mayor estrés hídrico y por tanto menor biodiversidad – Eficiencia energética limitada – Menor capacidad de retención de agua de escorrentía – Beneficios estéticos y sociales limitados 	<p><u>Ventajas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Mayor diversidad de plantas y hábitats – Buenas propiedades de aislamiento – Muy atractivo visualmente – Posibilidad de uso recreativo, uso agrícola local – Mayor eficiencia energética – Mayor eficiencia en retención de agua de escorrentía – Mayor vida útil de la membrana impermeable <p><u>Desventajas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Mayor carga sobre el edificio – Necesidad de riego y mantenimiento regular – Mayor coste de implantación y mantenimiento – Sistema más complejo
Ejemplo		

Tabla 1: Características generales de los sistemas intensivos y extensivos [15]

4.3.ASPECTOS TÉCNICOS E INGENIERILES

En esta sección se enumeran las consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar la implantación de un tejado verde. Por ejemplo, la estructura existente, la capacidad de carga que puede soportar, el acceso, orientación, exposición solar, posibilidad de ocupación o seguridad contra incendios.

Es importante tener en cuenta que la mayoría de las cubiertas verdes que se implantarán en un futuro se harán en edificios ya existentes. Es necesario modernizar y mejorar el stock actual de edificios, ya que se estima que solo 1 – 2 % de nuevas construcciones anuales se sumen al stock actual. Uno de los aspectos técnicos más relevantes a la hora de decidir o no la implantación de una cubierta verde es la sobrecarga que éste supone al edificio. Por lo que es de gran importancia conocer la capacidad estructural del edificio donde se quiere implantar una cubierta verde y conocer las sobrecargas que supone tanto permanentes como las cargas vivas [18]. Pero son muchos otros aspectos constructivos, ecológicos, de mantenimiento, tipos de materiales entre otros los que se deben de tener en cuenta a la hora de proyectar la construcción de un tejado verde.

4.3.1. MEMBRANA IMPERMEABLE

La impermeabilización es fundamental para el éxito de una cubierta verde. La puesta en obra de la membrana impermeable es un punto clave en el proceso de implantación de estos sistemas, ya que en el caso de que se produzca algún fallo, una reparación tendrá una dificultad mayor que en el caso de cubiertas convencionales, ya que para acceder a ella se deberá quitar el sustrato que está por encima alterando el estado de la vegetación. Por otro lado, si la instalación se hace correctamente, este tipo de sistemas aumentan un 100% la vida útil de las membranas impermeables.

Los requisitos más importantes que deben cumplir estas membranas son: resistencia mecánica tanto al peso de las capas superiores, a la acción del viento y a las sobrecargas de uso; deben ser resistentes a la penetración de raíces, por esta razón se suelen utilizar capas adicionales con características especiales como anti-raíces y resistencia a microorganismos.

Las membranas impermeables deben cumplir la normativa básica vigente: DB-HS: *Documento Básico de Salubridad*.

La capacidad anti-raíces de la membrana debe cubrir toda la cubierta aunque no se haya previsto vegetarla completamente. También deben de ser cubiertas inmediatamente con una capa de protección contra daños mecánicos y contra la radiación ultravioleta.

La superficie exterior del sistema de impermeabilización debe estar protegida totalmente de posibles daños mecánicos con un elemento estable y resistente a la intemperie, a la humedad y al hielo. En las zonas con elementos verticales, zonas perimetrales y en los caminos de circulación se recomienda utilizar las protecciones pesadas con gravas y con losas. La capa protectora de grava debe ser de cantos rodados y estar limpia, sin sustancias extrañas. La granulometría mínima debe ser 10 mm y debe formar una capa de un espesor mínimo de 5 cm. Esta protección de grava solo se podrá utilizar en tejados con pendientes inferiores al 5%.

4.3.2. CAPA DRENANTE

Esta capa se encuentra entre la capa de impermeabilización y el sustrato. Su función es favorecer que el sustrato se mantenga aireado, almacenar agua para las épocas más secas y drenar el exceso de agua. Esta capa debe estar conectada al los elementos del sistema de drenaje tales como canalones, bajantes y sumideros.

La capa de drenaje no es un elemento común de todos los tipos de cubiertas verdes. En los casos en los que no se utilice esta capa el sustrato debe ser lo suficientemente permeable y la cubierta debe tener una pendiente suficiente para poder drenar el agua sobrante.

Esta capa debe tener una capacidad de flujo suficiente para poder evacuar el volumen de agua que el sustrato no puede retener y evitar el anegamiento de la cubierta. La capacidad de flujo dependerá de dos factores: el gradiente hidráulico y la presión de confinamiento aplicada al geocompuesto. Los estándares europeos (BS EN 13252: 2014 + A1:2015) requieren que los fabricantes de estos geotextiles tengan un gradiente hidráulico de 1 y una presión de confinamiento de 20 KPa. En referencia a las especificaciones y cálculo de la capa drenante se debe revisar la NTE ASD/1977: *Acondicionamiento del terreno. Saneamiento: Drenajes y Avenamientos*.

Una capa superficial de grava en una anchura de aproximadamente 400 mm desde el exterior se recomienda para proporcionar un drenaje adicional cerca de los puntos de vertido, control de incendios y facilitar el acceso.

4.3.3. CAPA FILTRANTE

En el caso de las cubiertas que dispongan de una capa drenante será necesario que dispongan de una capa filtrante formada por una lámina filtrante situada entre la capa de sustrato y la capa drenante. La función de esta capa es impedir el paso de las partículas finas del sustrato y la consecuente obstrucción de la capa drenante.

La capa filtrante, habitualmente llamada geotextil, está formada por fibras sintéticas. Algunas de las características que deben cumplir son: resistencia a la compresión, imputrescible, debe tener una permeabilidad diez veces mayor a la del sustrato y puede permitir el crecimiento de raíces.

Esta capa debe ser capaz de dejar pasar el agua después de un largo periodo y debe poder absorber aproximadamente 1 l/s·m². Se deberá prescindir de esta capa en el caso de cubiertas inclinadas con dispositivos de protección contra el deslizamiento.

4.3.4. CAPA DE SUSTRATO

Esta capa ejerce la función de suministro de nutrientes, agua y oxígeno y soporte físico a la vegetación. La elección del espesor del sustrato está directamente relacionado con la elección de las especies de plantas que se vayan a implantar, las condiciones microclimáticas (particularmente la demanda de evapotranspiración de la zona). Pero como mínimo debe tener un espesor de 4 cm.

Algunas de las características que debe tener el sustrato son: buena capacidad de retención del agua, alto contenido de fracción mineral, alta capacidad de intercambio catiónico, alta bioestabilidad, baja tasa de contracción, componentes de baja inflamabilidad, baja alcalinidad.

De manera orientativa se muestran los valores recomendados de las propiedades de los sustratos indicadas en las directivas de la Asociación Alemana para la Investigación del Desarrollo y Construcción del Paisaje (Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbergrünungen, 1995) para el caso de cubiertas extensivas, también se pueden consultar las características recomendadas para sustratos en cubiertas intensivas en la NTJ-11E. Se debe tener en cuenta que estos valores son orientativos ya que dependerán del clima de cada zona.

Propiedad	Recomendaciones para sustratos		Unidad
	Con capa drenante	Sin capa drenante	
Granulometría			
Partículas de d ≤ 0.063 mm	≤ 15	≤ 5	% peso
Partículas de d = 0.063-2 mm		≥ 15	% peso
Partículas de d ≥ 2 mm	30 - 60		% peso
Densidad			
Sobre materia seca		0.6 – 1.2	g/cm³
Sustratos barrera	1.0 – 1.6		g/cm³

Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales	0.6 – 1.3		g/cm³
A máxima capacidad de agua		0.8 – 1.4	g/cm³
Sustratos barrera	1.4 – 2.2		g/cm³
Sustratos a base de fragmentos de materiales minerales	1.0 – 1.8		g/cm³
Contenido de aire/agua			
Porosidad total	-	-	% vol.
Máxima capacidad de agua	≥ 35	≥ 20	% vol.
Contenido de aire a máxima capacidad de agua	≥ 10	≥ 10	% vol.
Permeabilidad del agua (k)	≥ 0.001	≥ 0.1	cm/s
pH, carbonatos y salinidad			
pH	6.5 – 8.0	≤ 9.5	g/l
Carbonatos	≥ 25	≥ 25	g/l
Salinidad	≥ 3.5	≥ 3.5	g/l
(ideal)	≥ 1.0	≥ 1.0	
(en caso necesario)	≥ 2.5	≥ 2.5	
Materia orgánica			
Contenido en materia orgánica	3.0 – 8.0		% peso
Nutrientes			
Capacidad de intercambio catiónico	≥ 60		mmol/Z/l
Nitrógeno (N)	≤ 60		mg/l
Fósforo (P ₂ O ₅)	≤ 150		mg/l
Potasio (K ₂ O)	≤ 150		mg/l
Magnesio (Mg)	≤ 120		mg/l

Tabla 2: Valores recomendados para sustratos en cubiertas extensivas [19]

En la NTJ-11E se recomiendan también las curvas granulométricas que debería tener un sustrato dependiendo de si el sistema dispone de capa drenante o no.

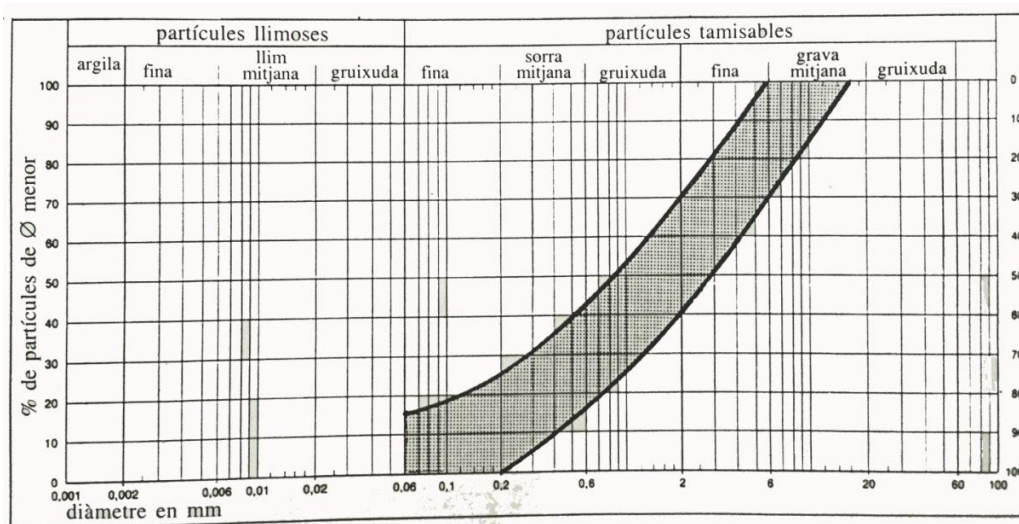


Figura 6: Granulometría del sustrato con capa drenante

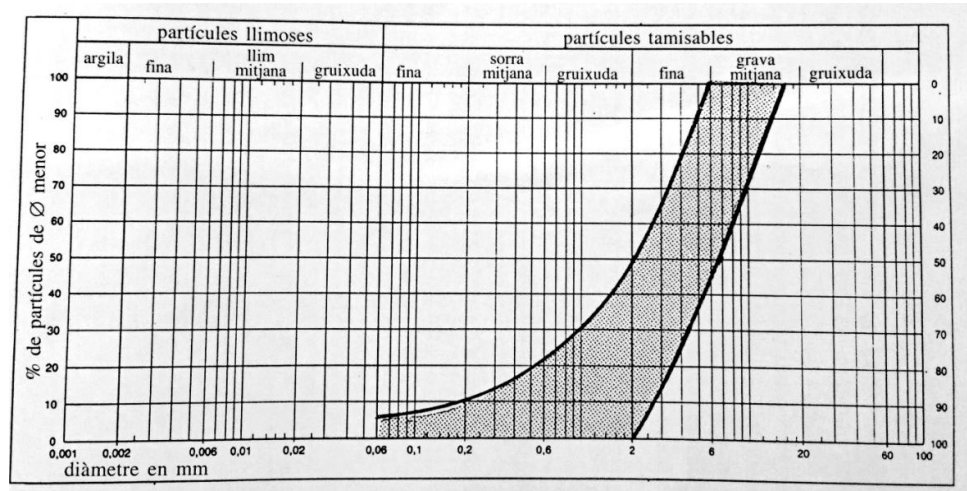


Figura 7: Granulometría sustrato sin capa drenante

4.3.5. CAPA DE VEGETACIÓN

Actualmente, son varios los parámetros que determinan qué especies de plantas se pueden elegir para un tipo de tejado y una ubicación en particular. Éstos incluyen: la capacidad de las plantas para sobrevivir y crecer en un determinado sustrato con un espesor dado y un clima específico de la zona, el coste de instalación y mantenimiento de la planta y, en cierto grado, el atractivo estético de las especies elegidas.

Independientemente del clima local, las especies más ampliamente utilizadas hasta el momento en tejados verdes con espesores pequeños (extensivos), que tienen una tendencia a secarse rápidamente, son especies tipo *sedum*. Este tipo de plantas tienen la capacidad de establecerse rápidamente, proporcionan buena cobertura superficial, sobreviven en un rango de condiciones ambientales bastante amplio y requieren un mantenimiento bajo. En los últimos años, sin embargo, en el campo de la investigación científica, se están considerando más especies debido a su potencial para proporcionar más beneficios ambientales. En consecuencia, también se están considerando una mayor variedad de espesores y composiciones de sustrato asociados a esta gama más amplia de especies vegetales.

Las características generales que deben tener las plantas que se elijan para una cubierta verde se enumeran a continuación:

- Ser resistentes a las condiciones climáticas de la ciudad y del edificio en concreto (sombra, orientación, horas de insolación, protección o no contra el viento, humedad relativa, rango de temperaturas...)
- Las necesidades hídricas de las plantas adaptadas a épocas de sequía en periodos de verano. Aunque la cubierta sea de tipo extensiva, siempre necesitará un suministro puntual de agua en momentos de precipitación limitada y máximas temperaturas. La elección se puede orientar hacia especies autóctonas que ya estén adaptadas a las condiciones climáticas.
- Resistencia a la acumulación temporal de agua.
- Resistencia a fuertes radiaciones y al efecto de reflexión.
- Resistencia a la acción del viento.
- Tolerancia a la contaminación atmosférica.

- Tanto en las cubiertas extensivas como intensivas la selección de especies estará influida por el sistema radicular poco profundo, no pivotante y de poco mantenimiento. En particular en las intensivas, el sistema radicular no debe ser axonomorfo.

Son adecuadas muchas plantas suculentas de la familia de las crasuláceas, así como otras especies de plantas viváceas, herbáceas perennifolias y cespitosas. En el anejo II de la NTJ-E11 se provee una amplia lista de posibles especies que se podrían utilizar para las cubiertas vegetales. Se han seleccionado aquellas que cumplían los criterios de clima (clima mediterráneo litoral), con una altura de crecimiento inferior a 30 cm y que se encontrasen en la zona de rusticidad a la que pertenece Barcelona (Z9) según la misma norma indica. Los posibles grupos son: herbácea cespitosa (hc), herbácea perennifolia (hp), planta suculenta (ps), planta viva (pv) y sub-arbusto o mata (sa).

Nombre científico	Grupo	Altura [cm]	Exposición a la luz solar
Aenium canariense	Ps	20 - 35	Pleno sol
Aenium sedifolium	ps	15 - 40	Pleno sol
Cephanolphyllum alstonii	Ps	7 - 12	Pleno sol
Cineraria saxifraga	Hp	20 - 30	Pleno sol y media sombra
Crassula lactea	ps	15 - 30	Pleno sol
Crassula multicava	Ps	15 - 40	Pleno sol y media sombra
Crassula muscosa	Ps	15 - 50	Pleno sol y media sombra
Crassula radicans	Ps	5 - 15	Pleno sol
Cyanolis somaliensis	hp	15 - 20	Pleno sol
Disphyma crassifolium	Ps	5 - 10	Pleno sol
Drosanthemum floribundum	Ps	10 - 15	Pleno sol
Drosanthemum hispidum	ps	15 - 20	Pleno sol
Einada nutans	hp	5 - 25	Pleno sol y media sombra
Faucaria trigina	ps	10 - 15	Pleno sol y media sombra
Fenestraria rhopalophylla	ps	5	Pleno sol
Gasteria acinacifolia	Ps	35	Pleno sol y media sombra
Gaznia rigens	hp	30	Pleno sol
Glottiphyllum linguiforme	ps	5 - 10	Pleno sol
Haworthia fasciata	ps	5 - 15	Media sombra
Heliotropium amplexicaule	pv	10 - 30	Pleno sol
Isotoma axillaris	hp	30 - 35	Pleno sol
Lampranthus blandus	ps	25	Pleno sol
Lampranthus deltoides	Ps	5 - 35	Pleno sol
Lotus berthelotii	Sa	10 - 30	Pleno sol
Lotus sessilifolius	Sa	5 - 10	Pleno sol
Osteospermum barberiae	Hp	10 - 50	Pleno sol
Pachyphytum oviferum	Ps	10 - 12	Pleno sol
Pelargonium peltatum	Sa	15 - 40	Pleno sol
Rhombophyllum rhomboideum	Ps	5	Pleno sol
Ruschia prostrata	Ps	5 - 7	Pleno sol
Sedum nussbaumerianum	Ps	15	Pleno sol
Senecio mandraliscae	Ps	15 - 30	Pleno sol
Senecio rowleyanus	ps	5 - 20	Pleno sol

Tabla 3: Plantas más utilizadas en las cubiertas verdes en Barcelona. Listado más exhaustivo en la NTJ 11E y NTJ 11I

4.3.6. ESTRUCTURA DEL TEJADO Y TIPOLOGÍA DE CUBIERTAS

Los tejados pueden ser inclinados o planos y comprenden una gran variedad de sistemas de impermeabilización. Independientemente del tipo de tejado es imprescindible hacer una inspección visual del tejado donde se quiera implantar una cubierta verde prestando atención a las condiciones del tejado, estado de la capa de impermeable e identificar los defectos del edificio.

Tejados con pendiente

Los tejados inclinados se encuentran normalmente en edificios residenciales pequeños y viejos. Las pendientes pueden alcanzar hasta 50° de inclinación, en cambio la inclinación máxima para que la implantación de una cubierta verde extensiva sea posible es de 35° [20] aunque existen estudios donde se consideran menores las posibles inclinaciones máximas.

Cuando la inclinación es muy pronunciada, el sustrato tiende a deslizarse por el efecto de la gravedad, pudiendo provocar sobrecargas repartidas irregularmente. Por esta razón este tipo de tejados necesitan unas especificaciones técnicas especiales. A partir de pendientes superiores a los 10° se considera una cubierta inclinada. En la figura que se muestra debajo se visualiza qué medidas se deben tomar por regla general para una cubierta ajardinada, siempre en correspondencia con los grados de inclinación.

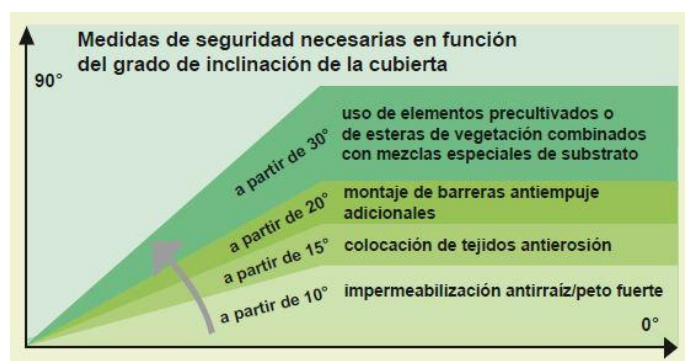
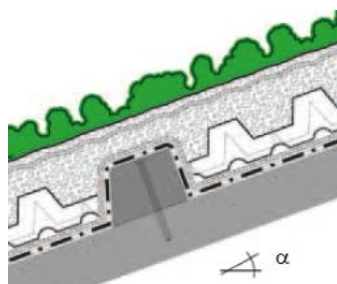


Figura 8: Medidas de seguridad para tejados inclinados [20]

En este tipo de cubiertas, son imprescindibles elementos especiales que reduzcan la erosión del sustrato como pueden ser tejidos anti-erosión, pero cuando las pendientes son más importantes serán necesarios elementos estructurales horizontales dispuestos en dirección perpendicular al empuje con el fin de sostener el sustrato. Un esquema de las barreras anti-empuje se muestra en la figura de abajo.



Se aconseja no exceder las distancias entre las barreras anti-empuje indicadas a continuación:

De 20°	Aprox. 10m
De 25°	Aprox. 8m
De 30°	Aprox. 5m

Figura 9: Barrera anti-empuje [20]

En resumen, en los tejados inclinados también se pueden implantar cubiertas verdes ya que existen sistemas especiales que evitan los problemas de tensiones tangenciales debido al propio peso del paquete de tejado. En las siguientes imágenes se muestran dos sistemas especiales para tejados verdes inclinados.

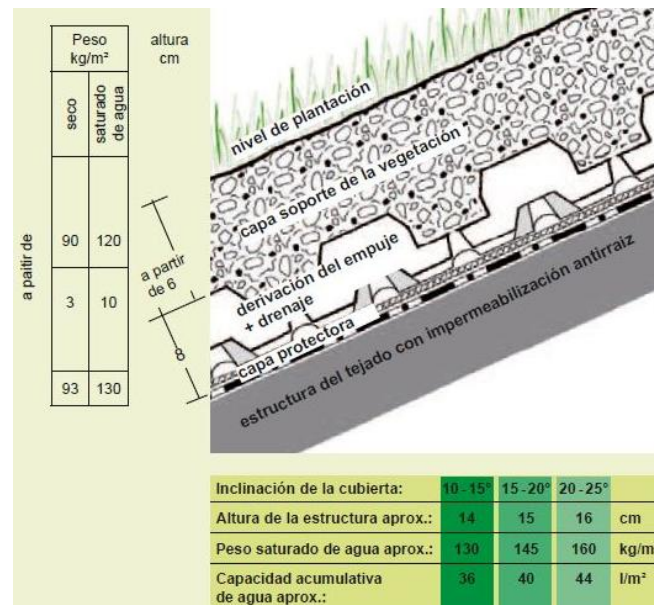


Figura 10: Sistema de tejado verde inclinado 10°-25° [20]

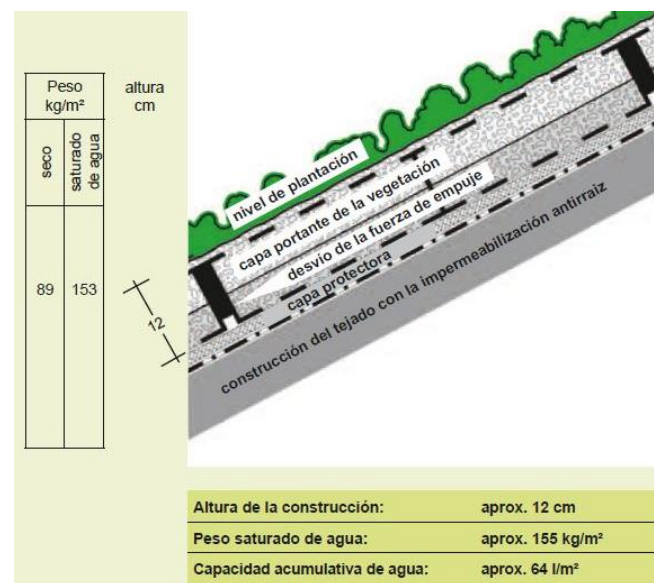


Figura 11: Sistema de tejado verde inclinado 26°-35° [20]

Para impedir que se produzca erosión, hay que procurar que la capa de vegetación sobre cubiertas inclinadas esté siempre cerrada. En este tipo de cubiertas el agua discurre más rápidamente y es más difícil retenerla. En la mayoría de los casos no es posible aumentar el espesor de la capa del sustrato, por tanto la selección de plantas está muy limitada, a no ser que se instale un sistema de riego adicional. Una consideración final que se debe hacer cuando se estudian este tipo de tejados es la orientación y como eso puede afectar al desarrollo de la vegetación.

Tejados planos

El término de cubiertas planas puede ser engañoso, ya que todas las cubiertas deben tener una pendiente mínima para evitar que se acumule agua en ésta y facilitar el drenaje del agua de lluvia. Por lo tanto se entiende como cubiertas planas aquellas con una pendiente inferior a 10° .

En el caso de las cubiertas planas, la instalación de un tejado verde es más sencilla, aunque se debe llevar a cabo igualmente un estudio de cargas estáticas y dinámicas para evaluar la capacidad de la estructura frente a estas sobrecargas.

A continuación se muestran algunos ejemplos de sistemas de tejados verdes para cubiertas planas que existen en el mercado y sus características técnicas.

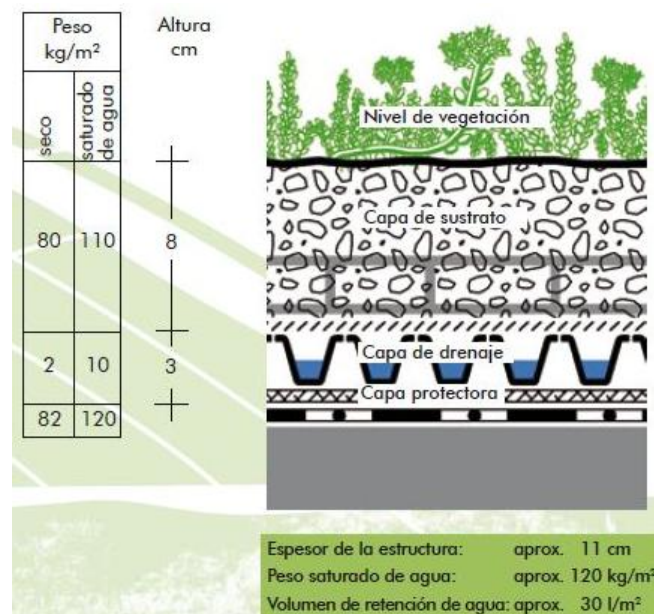


Figura 12: sistema cubiertas planas "Sedum tapizante" [21]

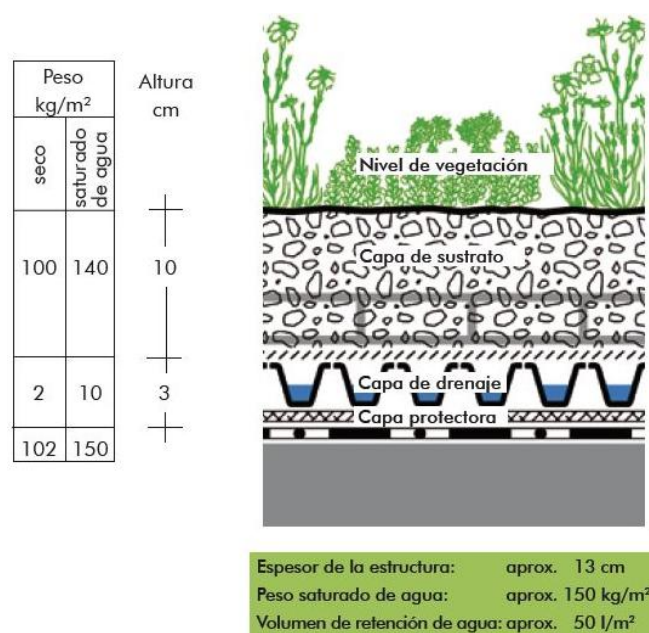


Figura 13: sistema cubiertas planas "tapizante floral" [21]

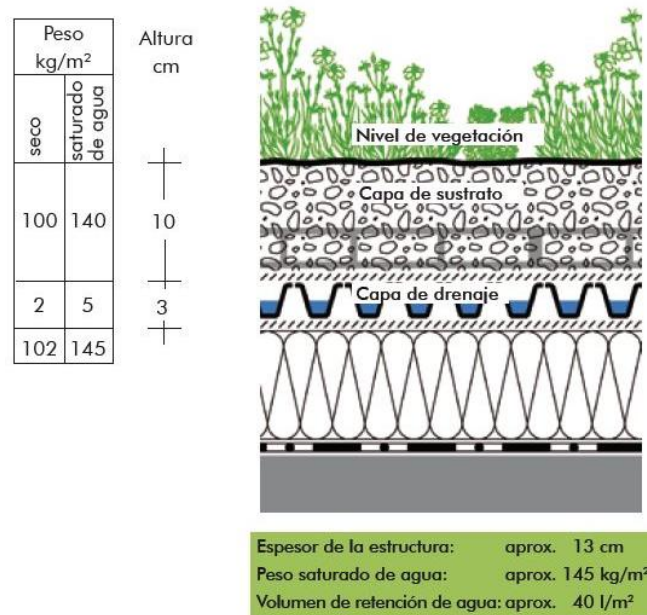


Figura 14: sistema cubiertas planas "tapizante floral, cubierta invertida" [21]

Tabla resumen tipos de tejados verdes	
Tejados inclinados	Tejados planos
<ul style="list-style-type: none"> – Hasta 35° de inclinación. – Mayor coste de instalación. – Riesgo de deslizamiento y necesidad de elementos especiales. – Dificultad de construcción mayor. – Mayor velocidad de circulación del agua a través del sustrato debida al efecto de la gravedad. 	<ul style="list-style-type: none"> – Hasta 10° de inclinación. – Menor coste de instalación. – Menor dificultad de instalación. – Mayor capacidad de retención debido a que la gravedad no afecta de igual forma que en las cubiertas inclinadas.

Tabla 4: Diferencias entre cubiertas inclinadas y planas

Otros tipos

Existen otras formas de tejados verdes donde se pueden instalar cubiertas verdes, la forma del tejado dependerá de cada caso y deberá ser estudiado independientemente. Por ejemplo pueden encontrarse tejados abovedados o curvos. Probablemente en estos casos especiales se necesiten soluciones adaptadas a cada caso.

También se pueden encontrar sistemas de tejados verdes modulares, en los que las plantas y sustrato se encuentran en bandejas o cajas con un sistema de almacenamiento de agua. El suelo está separado del sistema de drenaje por un tejido permeable que permite el flujo de agua pero impide el paso del suelo a la cámara de agua. Estos sistemas tienen una reducción en costes de mantenimiento e instalación ya que el sustrato y las plantas están previamente plantadas antes de su instalación.



Figura 15: Ejemplo de sistemas modulares. Fuente: www.greenroofs.com

4.3.7. ESPACIO DISPONIBLE

Es importante conocer qué porcentaje de área total de la cubierta es posible utilizar, ya que en las cubiertas de muchos edificios se instalan por ejemplo los equipos de aire acondicionado. Este factor puede ser determinante a la hora de decidir si es posible instalar una cubierta extensiva de uso comunitario porque se deberá tener en cuenta si es compatible el uso recreativo de la azotea junto con los equipos allí instalados.

4.3.8. EVACUACIÓN DE LAS AGUAS

Otro factor determinante en la instalación de cubiertas verdes es la gestión del agua de escorrentía. En este apartado se considera el sistema de desagüe. Estos sistemas permiten retener parte del agua de lluvia y conducirla hacia las canalizaciones. La instalación de desagües para este tipo de cubiertas consta de la capa drenante, los imbornales y los canalones. El sistema de evacuación de aguas pluviales debe ser capaz de evacuar toda el agua sobrante para evitar su encharcamiento.

Los imbornales deben estar situados en un nivel más bajo que la cubierta y se recomiendan que estén separados como mínimo 1 m de las esquinas, a 50 cm de los paramentos y a 30 cm de la vegetación. Deben existir varios puntos de desagüe en las cubiertas verdes para reducir al mínimo el riesgo de bloqueo de los imbornales. Los detalles sobre la capacidad, ubicación de los canales de agua de lluvia y puntos de desagüe deben averiguarse conforme a *DB-HS5: Salubridad, Evacuación de Aguas*.

Los imbornales deben estar provistos de un dispositivo para retener cualquier elemento sólido que pueda obstruir las bajantes (ver figura). La unión de la cubierta con los imbornales debe ser estanca. También se debe tener en cuenta que deben estar a la vista y ser fácilmente accesibles para que puedan ser rápidamente reparados en caso de que ocurra alguna avería. Su funcionamiento debe garantizarse mediante inspecciones y mantenimiento regular.

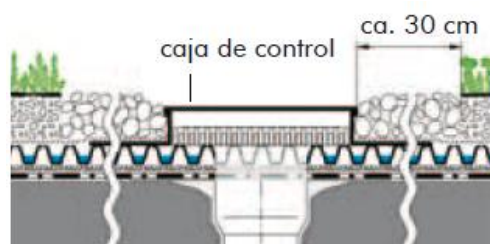


Figura 16: Sumidero en un tejado verde [21]

4.3.9. ACCESOS

El acceso a las cubiertas verdes debe ser considerado en cualquier diseño de este tipo de cubiertas. Este punto deberá tener una atención especial en el caso de que la cubierta esté pensada para su uso como espacio de ocio ya que se deberán tener en cuenta aspectos relevantes a la seguridad, como por ejemplo la instalación de barandillas perimetrales.

En el caso de cubiertas no transitables, también se tendrá que tener en cuenta el acceso para su mantenimiento. En la siguiente tabla se muestra las tareas de mantenimiento asociadas a diferentes elementos de las cubiertas y la frecuencia con la que se deben realizar.

Grupo de elementos	Tareas de mantenimiento	Frecuencia
<u>Elementos constructivos:</u> muros y límites perimetrales, pavimentos, impermeabilización.	Inspección técnica visual, revisión de fijaciones, detección de posibles puntos conflictivos y conservación del buen estado de todos los elementos de obra.	Dos o tres veces al año
<u>Instalaciones:</u> desagües, sistema de riego (en el caso de que lo haya), instalaciones asociadas al edificio (ej. Aire acondicionado)	Inspección visual, control y limpieza de imbornales, canalones, control y revisión de las instalaciones asociadas al edificio	Cada tres meses
Mobiliario y elementos auxiliares (en el caso de cubiertas transitables)	Inspección técnica visual, limpieza	Una vez al año
Vegetación	Podas, eliminación de malas hierbas, fertilización	Dependerá de la vegetación

Tabla 5: Tareas de mantenimiento [15]

4.3.10. CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Como ya se ha adelantado, antes de diseñar un sistema de cubiertas verdes, es crítico, en primer lugar, realizar un estudio estructural para determinar si la estructura del edificio tiene capacidad suficiente para soportar la sobrecarga. La capacidad de sobrecarga que pueda soportar el edificio determinará si se puede instalar un sistema de tejado verde, y en el caso de que sea posible, determinará el espesor del paquete de tejado.

La instalación de cubiertas verdes en edificios existentes debe cumplir los requisitos de seguridad estructural (capacidad portante y estabilidad) y aptitud de servicio establecidos en el *DB-SE-AE: Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación*. Según esta normativa se deben considerar las sobrecargas de uso siguientes:

Cubierta solamente accesible para su conservación	100 kg/m ²
Cubierta de uso privado	150 kg/m ²
Cubierta de uso público	(según el uso)

Tabla 6: Sobrecargas debidas al uso

El peso agregado de las cubiertas verdes a la estructura variará según el espesor del sustrato en gran medida y del resto de elementos que componen el paquete de tejado. Es importante tener en mente que se debe calcular la resistencia del edificio con el peso del paquete de tejado verde saturado, ya que supone la situación más crítica. Se deberán tener

en cuenta tanto las cargas estáticas como dinámicas especificadas en el Código Técnico de Edificación como sobrecargas por viento, sobrecargas por nieve, cargas de uso y el propio peso de la cubierta original.

Los valores más frecuentes encontrados en diferentes bibliografías sugieren que el peso propio de una cubierta ecológica extensiva es de 40 kg/m² (en seco) como mínimo y de 120-150 kg/m² a capacidad máxima de agua. En el caso de una cubierta intensiva el peso como mínimo es de 120-150 kg/m², pudiendo alcanzar los 500 kg/m². En la siguiente tabla se resumen las cargas aproximadas asociadas a cada tipo de cubierta verde:

Cubierta extensiva	≤ 150 kg/m ²
Cubierta semi-intensiva	150 - 350kg/m ²
Cubierta intensiva	≥ 350 kg/m ²

Tabla 7: Sobrecargas según el tipo de cubierta verde

Se puede realizar un análisis más detallado de la sobrecarga que supone un sistema de cubierta vegetal teniendo en cuenta el peso de cada capa y el peso específico del sustrato y la capacidad de retención de agua de cada capa para considerar el caso más desfavorable que es en el cual el sustrato y la capa drenante están saturados. A continuación se citarán algunos valores de cargas recomendados por la Normativa Técnica de Jardinería (NTJ) y el catálogo de la empresa ZINCO [21].

La capa drenante, en el caso de que sea de gravas tiene un peso de 19 kg/m², si es una mezcla de gravas y arenas será de 18 kg/m². En el caso de que sea sintético dependerá del proveedor, pero puede ser de entre 1 - 2 kg/m², teniendo en cuenta que tiene una capacidad de retención de entre 3 - 27 l/m². La capa anti-raíces tiene un peso aproximado de 0.73 kg/m² y la capa retenedora de 0.9 kg/m² y una capacidad de retención de unos 7 l/m². El peso de la vegetación estará entre los 5 - 10 kg/m². La densidad del sustrato seco es aproximadamente de 0.95 g/cm³ y saturado de 1.8 g/cm³, pero este valor deber ser dado por el fabricante.

El peso de cada paquete de tejado dependerá, en gran medida de su espesor y en menor medida de las características de cada capa. Se debe calcular el peso para el caso de tener saturado tanto el sustrato como la capa drenante y además tener en cuenta el caso en el que el tejado esté anegado y se retenga una capa de agua encima del sustrato, que dependerá de la altura de la berma.

4.3.11. RESISTENCIA AL FUEGO

Las cubiertas verdes deberían presentar cierta resistencia al fuego igual que lo hacen las cubiertas convencionales según la normativa vigente NBE-CPI: *Condiciones de protección contra incendios en edificios*.

Se ha demostrado en estudios realizados en Alemania que es muy difícil que un tejado verde se prenda fuego. El riesgo de propagación de un incendio es 15 - 20 veces mayor en cubiertas desnudas con membranas bituminosas impermeables que en cubiertas verdes.

Para reducir el posible riesgo de incendio se debe tener en cuenta el contenido orgánico del sustrato, el tipo de vegetación y los efectos de propagación. Las autoridades alemanas consideran que solamente los tejados extensivos son resistentes contra incendios si [17]:

- El espesor del sustrato es mayor de 30 mm.
- El sustrato contiene menos del 20% de materia orgánica en masa.
- Se dejen espacios de un metro de ancho cubierto por gravas cada por cada 40 m.
- Todos los elementos estructurales o de cualquier otro tipo que estén en el tejado deben estar rodeados por una franja de grava.

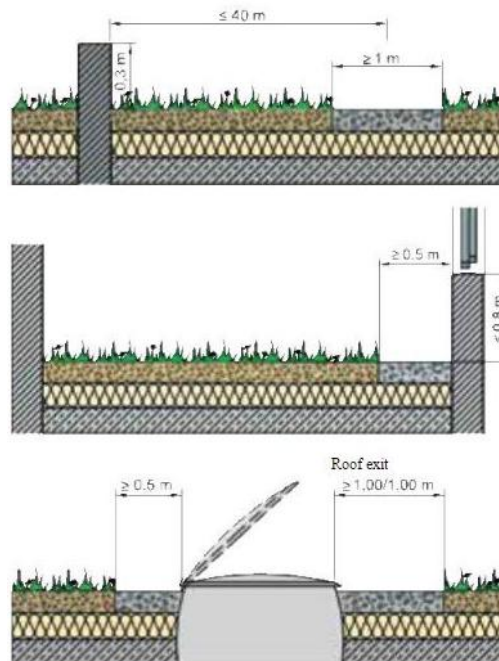


Figura 17: Medidas contra incendios.[22]

4.3.12. RESISTENCIA AL VIENTO

Una estructura de tejado verde también debe ser protegida contra el arrastre del viento. La cubierta se considera segura contra el viento si las fuerzas del viento no son capaces de movilizar los granos de grava o de sustrato. Se recomiendan las siguientes medidas de seguridad para evitar el arrastre del viento [23]:

- Tiras de grava en los bordes y esquinas.
- Dependiendo de la ubicación del edificio, la colocación de vegetación pre-cultivada puede ser necesaria, especialmente en los bordes y esquinas.
- En las zonas interiores generalmente no es necesaria ninguna actuación especial. El uso adicional de vegetación pre-cultivada es aconsejable para edificios altos en zonas de viento y para edificios especialmente expuestos.

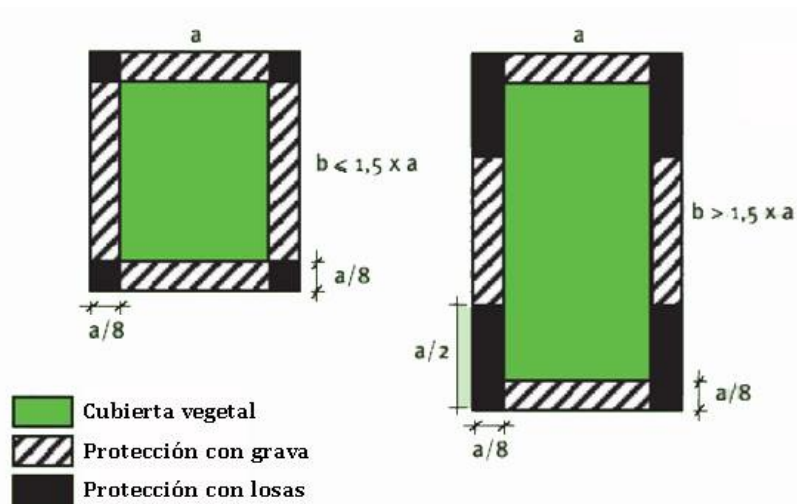


Figura 18: Protección contra incendios

4.3.13. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

Las operaciones de mantenimiento son claves para el correcto funcionamiento de las cubiertas verdes. Un tejado verde puede ser diseñado para que tenga un mantenimiento mínimo, pero nunca nulo.

Se deben realizar un mantenimiento regular de los elementos constructivos para una protección duradera contra incendios, contra la penetración de raíces, obstrucción de las bajantes, etc. La periodicidad de las inspecciones de estos elementos debe ser como mínimo una vez al año y se debe controlar la limpieza de los imbornales, estado de conservación de los elementos de obra de fábrica relacionados con el sistema de estanqueidad. Si durante alguna de las inspecciones se detectase algún problema debe ser inmediatamente reparado.

La vegetación también debe mantenerse. Durante los primeros meses, la cubierta está desprovista de vegetación y se debe prestar especial atención a que ninguna especie invasora aparezca. Después de la fase de implantación, una vez la cubierta vegetal es de aproximadamente el 60%, las medidas de control se reducen a una o dos visitas al año.

En el caso de que hubiese instalado un sistema de riego, se debe tener en cuenta que la dosis que necesitará la vegetación a lo largo del tiempo varía. La cubierta debe regarse hasta que las plantas estén instaladas, y se recomienda que también se rieguen durante largos periodos de sequía. Otro aspecto es la poda de las plantas. Incluso en el caso de las cubiertas extensivas, aunque la vegetación sea de crecimiento limitado, se deben de podar o segar para evitar un crecimiento excesivo.

En la Normativa Tecnológica de Jardinería y Paisaje NTJ-11I se puede encontrar un cuadro en el que se especifica la periodicidad de las operaciones de mantenimiento de la vegetación

4.4.BENEFICIOS

4.4.1. AISLAMIENTO TÉRMICO

Las fachadas y cubiertas están sometidas a unas determinadas condiciones de entorno (radiación, viento, temperatura y humedad) que son controladas por las características de los materiales constructivos. La inercia térmica determina el tiempo en que se transmite la energía a través de una cubierta. En el caso de las cubiertas verdes, el aumento de la inercia térmica permite reducir el coeficiente de transmisión al interior como mínimo un 60%.

Los cálculos realizados en el informe de sostenibilidad del anteproyecto del Parq d'Àcollida d'Animals de Companyia de l'Ajuntament de Barcelona da las siguientes transmitancias (valores medios, ya que varían según la estación del año):

Tipo de cubierta	Transmitancia [W/m ²]
Sin aislamiento	1.11
Con aislamiento y 0% vegetación	0.47
Con aislamiento y 80% vegetación	0.414
Con aislamiento y 100% vegetación	0.4

Tabla 8: Valores de transmitancias[24]

La configuración de los materiales que constituyen las cubiertas verdes y los sustratos pueden tener diferentes tipos de rendimiento en términos de transmitancia de calor. Se ha comprobado que hay diferencia entre sustratos húmedos y secos.

Las cubiertas sin sistemas de riego con un sustrato de menos de 2.5 cm no crean un efecto adiabático y si además mantienen una superficie de cobertura vegetal muy pobre, pueden provocar un aumento de la conducción de calor al interior del edificio. Este fenómeno de inversión es debido a la falta de humedad en el sustrato, factor que repercute en el crecimiento de las plantas. La tierra normalmente es de color oscuro y tiene mayor conductividad térmica, si la cobertura vegetal es insuficiente, la exposición directa a la radiación solar provoca que la tierra se caliente más que la propia cubierta convencional.

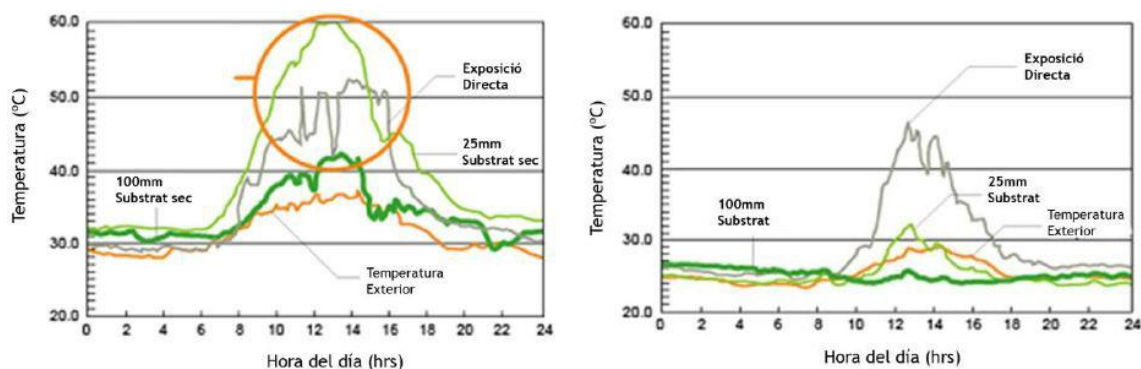


Figura 19: variación de la temperatura superficial con sustrato <100mm (izquierda) sin riego (derecha) con sistema de riego

4.4.2. AISLAMIENTO ACÚSTICO

Los sistemas de cubiertas verdes permiten reforzar el aislamiento de las vibraciones producidas en el exterior de los edificios. Según algunos datos publicados, una cubierta

verde puede aislar desde 8 dB hasta 20 dB gracias a la capacidad de absorción del sustrato vegetal y a las otras capas.

4.4.3. BENEFICIOS EN LA EDIFICACIÓN

Una cubierta verde añade una capa de aislamiento adicional a la cubierta. Las diferencias de temperatura a lo largo de un año así como la radiación UV directa sobre una cubierta, aceleran el envejecimiento de la membrana impermeabilizante, facilitando la aparición de grietas. Tanto la vegetación como el sustrato protegen a la membrana impermeabilizante mediante el amortiguamiento de las fluctuaciones de temperatura.

Este tipo de cubiertas aportan un valor añadido al valor de la finca ya que crean edificios más sostenibles y atractivos.

Algunos estudios sugieren que los edificios con cubiertas verdes tienen una prima en el mercado inmobiliario. Los edificios certificados mediante el *U.S. Green Building Council's Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) alcanzan rentas más altas y tienen una mayor ocupación en comparación con los edificios convencionales. Los propietarios de estos edificios también remarcan el valor de comercialización de las certificaciones, así como el ahorro en los costos operativos [25].

4.4.4. MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR

Durante el verano, las ciudades son lugares más calientes que las zonas de la periferia urbana y las zonas rurales porque la concentración de edificios y superficies pavimentadas mantiene y libera lentamente la radiación solar, este es lo que se conoce como el “efecto de la isla de calor”. La gestión de este fenómeno no es solamente una cuestión de confort sino de salud pública.

El balance de calor en la ciudad está determinado por las características climáticas, morfológicas y materiales del espacio urbano. El fenómeno de isla de calor se produce precisamente por las modificaciones que estos factores provocan sobre el clima. Las medidas realizadas en diferentes entornos urbanizados muestran una diferencia térmica de hasta 4°C entre las zonas rurales periféricas y las urbanas.

La contribución potencial de las cubiertas ecológicas a la mitigación de la isla de calor se define por las ganancias, pérdidas y almacenamiento de energía, es decir el balance de energía. La relación de la vegetación con el microclima es muy importante, ya que, a diferencia de otros materiales (igual que el agua), inciden sobre el balance de calor sensible y de calor latente.

Las plantas interceptan la radiación solar directa a través de la superficie foliar, y convierten parte de esta energía solar en cadenas químicas mediante la fotosíntesis. Las hojas de una cubierta vegetal pueden absorber entre un 15 y un 35% de energía luminosa durante las horas de máxima insolación. La sustitución de materiales como el asfalto o el hormigón por superficies vegetadas permite disminuir las temperaturas superficiales.

4.4.5. REDUCCIÓN DE ESCORRENTÍA

Las cubiertas verdes pueden ser una forma de atenuar el agua de escorrentía. El problema de las inundaciones pluviales en términos de costes e impactos en los asentamientos

urbanos es el punto de partida para la discusión sobre el potencial de los tejados verdes como una medida de mitigación.

El riesgo de inundación en las zonas urbanas está aumentando debido a los cambios hidrológicos derivados del proceso de urbanización, estos cambios son: un aumento de la superficie impermeable, reducción de la infiltración, aumento del volumen de escorrentía, cambio de los materiales de la cubierta (menos rugosos), aumento de la velocidad de circulación del agua en superficie, aumento del caudal punta de respuesta, reducción del tiempo al pico y un deterioro de la calidad del agua.

Probablemente uno de los principales beneficios de las cubiertas verdes sobre el metabolismo urbano es la habilidad de retener el agua de lluvia. Las cubiertas verdes sirven como un depósito de acumulación de agua de precipitación. Las cubiertas verdes son instrumentos muy importantes en la prevención de inundaciones locales, ya que según el sistema de cubierta verde y la profundidad del sustrato, el agua de lluvia que va directamente al alcantarillado se puede reducir entre un 50% y un 90%. Además este tipo de cubiertas pueden filtrar y absorber una parte de la contaminación que arrastra el agua de lluvia.

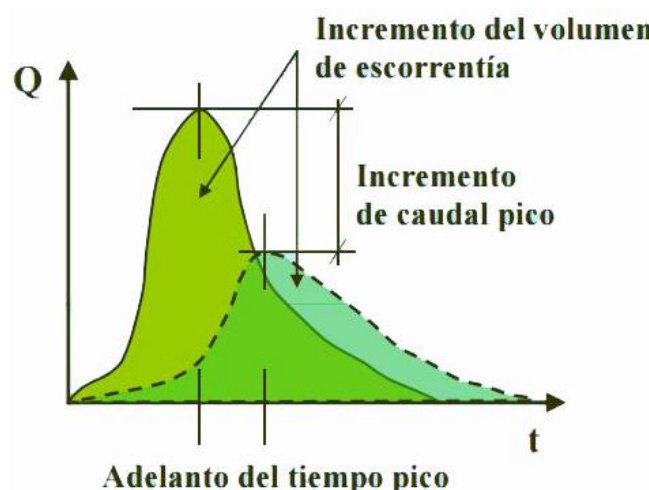


Figura 20: Modificaciones en el hidrograma

4.4.6. BIODIVERSIDAD

Es evidente que el crecimiento rápido y continuo de las ciudades tiene importantes efectos sobre la flora y fauna, de hecho el proceso de urbanización se ha reconocido como la amenaza principal para la biodiversidad global.

A medida que avanza el proceso de urbanización, algunos hábitats se pierden por completo, mientras que los hábitats restantes se fragmentan, aislando estos hábitats individuales. La urbanización también disminuye la complejidad estructural de la vegetación, ya que se elimina el paisaje autóctono y se reemplaza con hierbas y vegetación simple típica de los jardines que encontramos en las ciudades.

Los tejados verdes ofrecen una solución potencial al dilema de la biodiversidad urbana, convirtiendo los espacios no utilizados de los tejados convencionales en hábitat para las especies nativas. Al mismo tiempo, estos micro-hábitats pueden aumentar la conectividad

entre ellos proporcionando así una solución a la fragmentación de hàbitats antes mencionada.

Aunque los beneficios potenciales de la biodiversidad de los tejados verdes pueden parecer interesantes, un cierto escepticismo está justificado debido a varios factores importantes que podrían hacer que los tejados verdes no sean adecuados para la conservación de la biodiversidad. Por ejemplo, los tejados verdes por lo general son pequeños, por lo que su capacidad como hàbitat esté limitada a pequeños animales como insectos y pájaros. Además, para su correcto funcionamiento, las especies vegetales que se pueden imponer están limitadas.

4.4.7. MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La vegetación es capaz de mejorar la calidad del aire. Se ha demostrado que es efectiva a la hora de reducir la contaminación atmosférica por la capacidad que tiene de filtrar partículas y absorber gases contaminantes.

Las plantas interactúan con los agentes contaminantes y pueden fijar parte de las partículas que están en el aire mediante dos mecanismos: por sedimentación y por impacto. Además, la vegetación, por su actividad fisiológica, fija el CO₂ y libera O₂. Por tanto, las cubiertas ecológicas pueden ser elementos importantes para la fijación de gases de efecto invernadero.

4.4.8. ASPECTOS SOCIALES

Está demostrado que aumentar el verde urbano tiene un impacto sobre las personas como espacios de relación y recreo. En este sentido, los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud son que la población debe tener una dotación de cómo mínimo 10 m² de verde urbano en ámbitos consolidados hasta 15 m² para personas en zonas de nueva construcción. Se considera como óptimo que la población tenga próximos, al menos de 300 m de distancia, un espacio verde. Por esta razón las cubiertas verdes pueden permitir aumentar los espacios verdes cercanos a la población.

El buen diseño urbano pretende ofrecer entornos urbanos atractivos, agradables, útiles y sobre todo habitables que apoyen y mejoren las comunidades locales. Algunos de los beneficios asociados a “la creación de lugares mejores y sostenibles para las personas” se enumeran a continuación [17]:

- Cohesión de la comunidad: los tejados verdes pueden ayudar a unir a las comunidades. Aumentando las oportunidades para la interacción y creando ambientes más agradables.
- Educación: mediante el uso de espacios verdes como parte de la gestión del ciclo del agua, esto proporciona muchas oportunidades para apoyar la educación tanto familiar como en las escuelas y las comunidades en su conjunto a través de grupos ambientales.
- Salud y bienestar: los tejados verdes pueden desempeñar un papel importante en el mantenimiento de la salud mental y física al proporcionar lugares para la recreación y la relajación.
- Potenciar la agricultura urbana: estos espacios se podrían utilizar como espacios para la agricultura urbana.

4.5.COSTE

Las cubiertas verdes son más costosas de construir que las cubiertas convencionales. Muchas veces este sobrecoste se justifica por el aumento de la vida útil de estas cubiertas. Sin embargo, este tipo de justificación también tiene que tener en cuenta el mantenimiento de las cubiertas verdes, que por lo general es más costoso que una cubierta convencional.

Pero se debe tener en cuenta que las cubiertas vegetales tienen otros beneficios que pueden compensar este mayor coste inicial. Para muchas administraciones el conjunto de beneficios, tanto privados como públicos, justifica los costes adicionales.

4.5.1. ANÁLISIS COSTE – BENEFICIO

Es indiscutible que las cubiertas verdes tienen numerosos efectos positivos sobre el medioambiente y las propiedades físicas de los edificios. Sin embargo todavía no se han consolidado en el mercado y esto se debe a los costes de inversión inicial y el compromiso de un mantenimiento adecuado a largo plazo. Para que la industria de tejados verdes pueda sobrevivir a largo plazo, los potenciales clientes deben recibir un análisis de costos y beneficios sencillo y detallado de su inversión. El Green Roof Service LLC realizó un análisis coste-beneficio sobre los tejados verdes extensivos que se explicará a continuación [26].

Las características de este ejemplo son un tejado verde extensivo de 930 m² con un espesor de sustrato de 115 mm y especies vegetales variadas. El sistema no tenía riego y se incluyen las franjas de grava y elementos especiales de instalación. Se han calculado los costes y beneficios en un periodo de 40 años.

Construcción del sistema de cubierta verde extensivo	152 \$/m ²
Gastos de mantenimiento a lo largo de 40 años	163 \$/m ²
Costes adicionales en la estructura debidos al incremento de carga	43 \$/m ²
Costes totales a lo largo de 40 años	358 \$/m²

Tabla 9: Costes potenciales asociados a la construcción de un tejado verde extensivo

El coste del conjunto de la impermeabilización. Aumento de la vida útil de la capa impermeable, e estima que se duplica la vida útil. Asumiendo que la vida útil de la capa impermeable sin la cubierta verde es de 20 años es de 272 \$/m ²	272 \$/m ²
Ahorro por aislamiento en 40 años. El efecto de aislamiento de las cubiertas verdes permite ahorrar 2.5cm de materiales aislantes convencionales.	33 \$/m ²
Reducción en costes de reparación en 40 años. El techo está protegido contra los daños mecánicos.	43 \$/m ²
Ahorros potenciales para el propietario del edificio	348 \$/m²

Tabla 10: Ahorros potenciales asociados a la construcción de un tejado verde extensivo

Con los datos que se muestran en las tablas se podría decir que el balance costes-beneficios es prácticamente nulo, en cambio, el punto clave de los tejados verdes es que la mayoría de los gobiernos locales han reconocido los beneficios públicos de estos sistemas, por lo que ofrecen incentivos para la instalación de estas cubiertas.

Ahorro a través de la reducción de las cargas de aguas residuales	9.2 \$/m ²
Incentivos tributarios típicos	33 \$/m ²
Incentivos directos tras la instalación a través de la reducción del	43 \$/m ²

seguro del edificio	
Ahorros potenciales preliminares para el propietario del edificio	85.2 \$/m²

Tabla 11: Ahorros potenciales asociados a la construcción de un tejado verde extensivo mediante incentivos

Costes totales a lo largo de 40 años	358 \$/m²
Ahorros potenciales para el propietario del edificio	348 \$/m²
Ahorros potenciales preliminares para el propietario del edificio	85.2 \$/m²
Ahorro total para el cliente en 40 años	75.2 \$/m²

Tabla 12: Resumen del análisis coste-beneficio

Como se ha demostrado, a largo plazo, los tejados verdes suponen un beneficio para el propietario del edificio. Se debe tener en cuenta que este análisis se ha realizado en Estado Unidos, por lo que los valores mostrados variarán para el caso de Barcelona, pero pueden resultar orientativos.

No se han encontrado estándares para la implementación de los tejados verdes, pero a continuación se especifican rangos de costes de componentes y se identifican algunas variables que pueden determinar estos costes [24].

Estudios y componentes	Coste	Notas y variables
Estudio de viabilidad estructural	0.1% del coste de la obra	Este estudio es imprescindible para instalar una cubierta verde en un edificio existente
Dirección de obra	0.3% del coste de la obra	El número y tipo de consultores necesarios dependerá de la complejidad del proyecto y la superficie
Cubierta extensiva	180-250 €/m ²	Incluye el coste de instalación, las plantas y la instalación del sistema de riego
Mantenimiento de la cubierta	10-20 €/m ²	Estos costes dependen de la tipología de cubierta, sistema de riego y especie de las plantas elegidas. Costes aplicables solamente para los dos primeros años (en muchos casos los distribuidores este tipo de cubiertas cubren los gastos de los primeros años)

Tabla 13: Costes aproximados de la implantación de cubiertas verdes[24]

4.6. EXPERIENCIAS A NIVEL INTERNACIONAL Y NACIONAL

Los tejados verdes se han popularizado en los últimos 10 años a nivel mundial porque son una de las pocas tecnologías que mitigan simultáneamente un abanico de problemas sociales, de salud y ambientales.

Es importante conocer algunas experiencias documentadas tanto a nivel internacional como nacional para aprender de posibles problemas que pueden aparecer, conocer su funcionamiento e implementación en casos reales. A continuación se nombrarán una selección de casos de cubiertas verdes que se han encontrado, pero se debe destacar que existen actualmente tejados verdes en funcionamiento en todo el mundo: Estados Unidos, Canadá, Japón, Singapur, China, Dinamarca, Noruega, Alemania, Francia, Inglaterra, Holanda...

Alemania fue el primer país en desarrollar los estándares nacionales de tejados verdes en los años setenta. Los tejados verdes se apoyan a nivel nacional, regional y local. Más de 80 ciudades alemanas ofrecen programas de incentivos para techos verdes. Más del 15% de todos los techos en Alemania son techos verdes (alrededor de un billón de metros cuadrados).

Toronto ha apoyado los tejados verdes mediante guías técnicas, talleres, y subvenciones. En 2009 el Ayuntamiento de Toronto impuso la obligatoriedad de tejados verdes por ley para todos los desarrollos de más de 2000 metros cuadrados. Antes de esta medida, Toronto tenía alrededor de 36000m² de tejados verdes. En los pocos años desde que se introdujo esta medida, están planificados o en construcción más de 170000 m².

En el año 1994, la Universidad Politécnica de Madrid realizó un proyecto de investigación en un edificio propio para realizar un monitoreo tanto del comportamiento del sistema constructivo como de la vegetación plantada. Se puede decir que formalmente fue la primera cubierta verde en España [24].

En Barcelona actualmente las cubiertas verdes tienen una presencia modesta. La superficie de cubiertas verdes es de aproximadamente 4ha. Entre algunas de las iniciativas municipales se pueden destacar la cubierta de la Fàbrica del Sol, la de la Biblioteca Zona Nord, y la de la nueva Biblioteca de Vil·la Florida.



Figura 21: Cubierta verde de la Biblioteca municipal Zona Nord. Nou Barris

4.7. INCENTIVOS Y SUBVENCIONES DEL AJUNTAMENT DE BARCELONA

Uno de los referentes más conocidos y con más experiencia en la implantación de cubiertas verdes es Alemania. Desde el 1987, ofrecen incentivos de hasta el 50% del valor para la construcción de cubiertas verdes. En estos casos se fomentan tanto los huertos como las cubiertas con diferentes tipos de grosor de sustrato con especies apropiadas de vegetación. En Alemania, los incentivos que ofrecen los gobiernos locales oscilan entre 10-20€/m² por tejado verde que se crea, ya sea en edificios privados como en zona comercial.

En el caso de Barcelona, el ayuntamiento pondrá en marcha cuatro tipos de medidas: económicas, con ampliación y simplificación de la campaña de ayudas, ofreciendo asesoramiento técnico para la activación de las cubiertas vivas, promoviendo reformas en el marco normativo y realizando acciones y actuaciones ejemplares [27].

- Incentivos y subvenciones: el ayuntamiento facilitará ayudas económicas para la rehabilitación y la re-naturalización de la cubierta, dirigidas a edificios privados,

tanto residenciales, industriales como equipamientos. Las ayudas para las obras de rehabilitación tendrán una subvención del 50% del coste total del proyecto si incluyen medidas de ahorro de energía, en el caso de que no haya medidas de ahorro de energía las ayudas serán del 25%. También se podrán pedir ayudas con una subvención del 50% del coste total del proyecto para los proyectos de ajardinamiento de cubiertas siempre que cumplan las características indicadas en la normativa.

- Asesoría técnica y divulgación: los servicios de asesoramiento que se ofrecerán son un análisis del proyecto técnico de ajardinamiento o de cubierta verde, primera inspección de la cubierta, primera valoración de elementos constructivos y configuración de la cubierta en relación a la idoneidad, seguimiento del proyecto y se ofrecerá asesoramiento, documentación y soporte técnico de cómo realizar cubiertas verdes y como mantenerlas, así como toda la información sobre los incentivos que promueve el ayuntamiento.
- Regulación (legislación y ordenanza): no existe una ley específica, pero hay diversos instrumentos legales de diferentes rangos de competencia (internacional, estatal y autonómico) que abordan estas cuestiones que tienen relación con la normativización de las medidas para la implantación de las cubiertas verdes. El ayuntamiento creará una normativa específica para la promoción de las cubiertas verdes en edificios de nueva construcción.
- Acciones y actuaciones ejemplares: todos los edificios municipales de nueva construcción incluirán, en la medida de lo posible, especificaciones para que la cubierta tenga uso público o colectivo y sea ajardinada.

4.8.RETOS FUTUROS

Los tejados verdes tienen numerosos beneficios, como ya se han enumerado anteriormente, y muchos edificios existentes en los centros urbanos son adecuados para su adaptación. Sin embargo, existen barreras que deben ser superadas. Muchas de las barreras se refieren a falta de información técnica. Las ciudades pueden superar esta falta de información trabajando junto con la industria y organismos de investigación para articular mejor los beneficios y costes de este tipo de drenaje urbano sostenible, así como ampliar el conocimiento general de la tecnología a través del intercambio de información, capacitación, programas de educación y apoyo técnico.

Los costes son una barrera clave para implantar más tejados verdes. La falta de información concisa sobre los costes asociados al diseño, instalación y mantenimiento y los beneficios que proporcionan. En cuanto a las cuestiones técnicas, la impermeabilización sigue siendo el motivo de preocupación para algunos propietarios de edificios aunque hay pruebas de que los tejados verdes prolongan la vida de un tejado. La selección de plantas adecuadas también es una cuestión que preocupa a los propietarios [16]. Otro aspecto técnico que puede limitar la extensión del uso de estas técnicas es la sobrecarga que supone al edificio y la necesidad de reforzar la capacidad estructural de los edificios.

Las cubiertas verdes deben entenderse como un elemento más de la política de drenaje urbano sostenible y creación de espacios verdes. Para que los beneficios que presentan los tejados verdes tengan un impacto suficiente en las ciudades se deben planificar a escala de

ciudad, no como elementos aislados de cada edificio, es decir, la construcción de un tejado verde aislado no tendrá efectos positivos en la reducción de la isla de calor o reducción de escorrentía superficial por ejemplo, por eso es necesario hacer un planteamiento a escala de ciudad y para ello se deben plantear políticas de urbanismo. Por lo tanto, los beneficios de la renovación de tejados verdes tienen efectos en todos los niveles, desde escala de la ciudad hasta la escala de edificios y la escala individual.

5. SWMM 5.1

5.1.INTRODUCCIÓN

El *Stormwater Management Model* (modelo de gestión de aguas pluviales) fue desarrollado por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (EPA) en 1971. Hoy en día, es uno de los softwares de cálculo de drenaje urbano más extendido. Una de las claves de la popularidad de este software es que es de dominio público y, por lo tanto, gratuito.

Es un modelo dinámico de simulación de lluvia-escorrentía que permite reproducir el comportamiento hidrológico e hidráulico de un sistema de drenaje urbano, tanto en términos de cantidad como de calidad del agua. El modelo de escorrentía o hidrológico utiliza un modelo agregado de depósito no lineal para calcular los hidrogramas de escorrentía superficial que se generan en la cuenca urbana debido a la precipitación. Este modelo de depósito no lineal considera también los procesos de infiltración, evaporación y almacenamiento en superficie, y es aplicable tanto a zonas impermeables como permeables de la cuenca de estudio. El módulo de transporte o hidráulico analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Así mismo, SWMM5 es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad de agua de escorrentía de cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

La última versión, la quinta, permite la simulación de módulos de drenaje urbano sostenible como tejados verdes, cunetas de infiltración y tanques de detención. También introduce el método de infiltración Horton modificado y otras mejoras en las opciones de cálculo de evaporación e infiltración.

5.2.MODELO CONCEPTUAL

SWMM5 conceptualiza un sistema de drenaje como una transferencia de flujos de agua y contaminantes entre los principales elementos de la red y el medio receptor:

- La atmósfera, que genera precipitación y deposita contaminantes en la superficie.
- La superficie de la cuenca, que recibe la precipitación y deriva los caudales generados en diferentes formas: evaporación y por tanto de nuevo a la atmósfera, infiltración y por tanto hacia el subsuelo y en forma de escorrentía hacia la red de drenaje.
- El subsuelo que recibe la infiltración que se produce en la superficie y puede transferir una parte del agua que recibe a la red de drenaje.
- La red de drenaje, formada por una serie de elementos que derivan los caudales que recibe hacia el medio receptor o plantas de tratamiento.

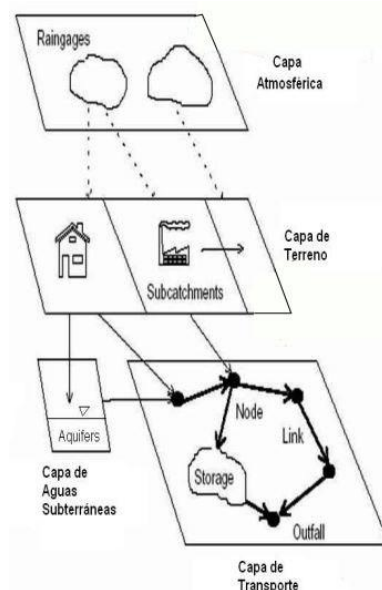


Figura 22: Esquema del modelo

5.3. MODELOS DE CÁLCULO

5.3.1. MODELO DE LLUVIA-ESCORRENTÍA

Los cálculos de la escorrentía están basados en un modelo de depósito modificado con la Onda Cinemática (Depósito No Lineal). El modelo divide cada sub-cuenca, en función de los parámetros introducidos, en una zona impermeable sin retención superficial, otra impermeable con retención y una última zona permeable con retención superficial. La escorrentía es generada aproximando el funcionamiento de cada una de estas zonas a un depósito como el representado en la figura que se muestra a continuación.

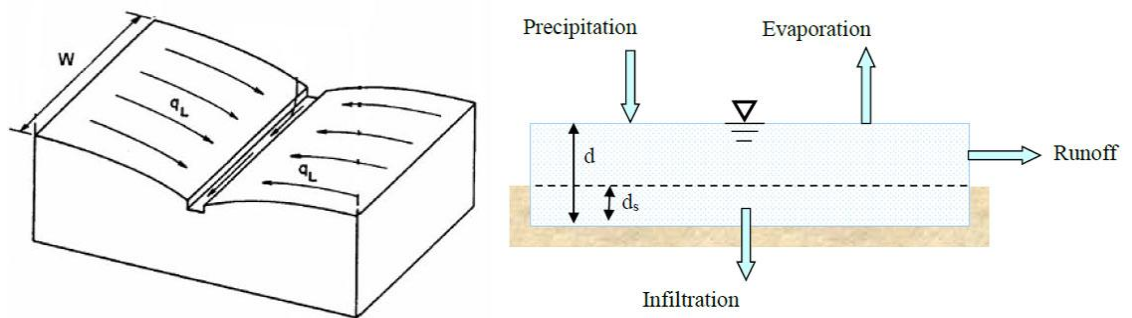


Figura 23: Modelo de depósito no lineal (derecha) y conceptualización de una sub-cuenca (izquierda) [28]

Según el esquema de la figura anterior, la sub-cuenca recibe un caudal de precipitación y a su vez tiene unas pérdidas por infiltración, almacenamiento en depresiones del terreno y evapotranspiración. La lluvia se acumula en superficie hasta la altura d_s , que representa la capacidad de retención en superficie que se ha asignado. A partir del planteamiento de conservación de masa se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta ecuación expresa el cambio de altura de lámina de agua d en el tiempo como la diferencia entre caudales de entrada y de salida.

- i Intensidad de precipitación
- e Evaporación
- f Infiltración
- q Caudal de escorrentía superficial

Asumiendo que el flujo de agua por la superficie de la sub-cuenca se comporta como flujo uniforme en un canal rectangular de ancho W , altura $d - d_s$ y pendiente S , la fórmula de Manning es válida para expresar el caudal de escorrentía Q :

$$Q = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} (d - d_s)^{\frac{5}{3}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$q = \frac{W S^{\frac{1}{2}} (d - d_s)^{\frac{5}{3}}}{A n} \quad \text{Ecuación 3}$$

Sustituyendo en esta última ecuación en la expresión inicial del balance de masas:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha(d - d_s)^{5/3} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\alpha = \frac{WS^{\frac{1}{2}}}{An} \quad \text{Ecuación 5}$$

La ecuación anterior es una ecuación diferencial no lineal ordinaria. Para valores conocidos de los parámetros i , e , f , d_s y α se puede resolver numéricamente para cada intervalo de tiempo para obtener la altura de agua acumulada d . Una vez d es conocido, los valores de escorrentía q también pueden ser obtenidos. En el caso en que d sea menor que d_s el valor de escorrentía superficial será cero. Esta ecuación se resolverá para cada trozo de área impermeable con retención, impermeable sin retención superficial y permeable de cada sub-cuenca. Esta ecuación se resuelve mediante un esquema en diferencias finitas de Newton-Raphson, para cada incremento de tiempo. Por este motivo, es conveniente evitar trabajar con sub-cuencas con áreas muy pequeñas e incrementos de tiempo largos, pues pueden provocar problemas de convergencia del esquema.

Como ya se ha adelantado, en el proceso de formación de agua de lluvia en escorrentía intervienen una serie de procesos. Una vez el agua de lluvia ha precipitado, no todo se convierte en escorrentía, se producen pérdidas por infiltración, evaporación y retención en superficie. A continuación, se explicarán en profundidad estos procesos.

5.3.2. RETENCIÓN E INTERCEPCIÓN

El agua que se queda en la superficie puede o no convertirse en escorrentía, puede acumularse retenida en zonas deprimidas o ser interceptada por elementos superficiales como las plantas. El orden de magnitud de estas pérdidas en comparación con la lluvia caída no será muy elevado, pero deberá tenerse en cuenta.

SWMM5 permite tener en cuenta este proceso asignando a cada cuenca el valor de retención en mm para zonas permeables y otro para zonas impermeables, así como el porcentaje de suelo impermeable que no presenta pérdidas por retención.

Este proceso es importante a la hora de evaluar cuencas grandes con diferentes usos del suelo, pero en este caso de estudio, estos valores no tendrán gran importancia ya que se pretende evaluar el funcionamiento y comportamiento de un tejado verde aislado.

5.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es la pérdida de agua de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por la transpiración de la vegetación. Los factores que intervienen en el proceso de evapotranspiración son diversos, variables en el tiempo y en el espacio y se pueden agrupar en aquellos de orden climático, los relativos a la planta y los asociados al suelo.

Las simulaciones de eventos aislados normalmente no son sensibles a este proceso, pero sí puede tomar un papel importante en simulaciones continuas.

SWMM5 permite introducir el proceso de evapotranspiración de diferentes maneras: un valor constante durante toda la simulación, valores de las medias mensuales, valores diarios, o introducir un fichero con datos de clima (temperatura, días de radiación, viento) y calcularla a partir de éste.

5.3.4. MODELO DE INFILTRACIÓN

La infiltración es el fenómeno por el cual el agua de lluvia penetra en el terreno de los suelos no saturados de las áreas permeables de cada sub-cuenca. SWMM5 permite seleccionar cinco modelos diferentes de infiltración: método clásico de Horton, Horton modificado, modelo de Green-Ampt, Green-Ampt modificado y el método del número de curva.

Método de Horton

El modelo de Horton permite simular la curva de capacidad de infiltración del suelo. Es un modelo empírico, que se basa en conceptos simplificados que permiten expresar la capacidad de infiltración como una función del tiempo, de constantes empíricas y parámetros del suelo.

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)^{-kt} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde k es una constante de decaimiento; f_0 capacidad de infiltración inicial; f_c máxima capacidad de infiltración; t es el tiempo.

Método de Green-Ampt

Este método asume la existencia de un frente húmedo brusco en el suelo que separa el suelo con un determinado contenido inicial de humedad del suelo completamente saturado de la parte superior. Los parámetros necesarios son el valor del déficit de humedad del suelo, la conductividad hidráulica del suelo y la altura de succión en el frente húmedo.

Método del Número de Curva

Este método fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) y tiene en cuenta el proceso de pérdidas en conjunto, de manera que incorpora tanto la infiltración como la retención e interceptación.

Para cualquier lluvia, la cantidad de agua que se convierte en lluvia efectiva (P_e) siempre es menor que la lluvia total precipitada (P); del mismo modo el agua infiltrada en la cuenca (F_a) es menor que una hipotética máxima retención potencial (S). La parte de lluvia que se pierde antes de iniciarse el proceso de escorrentía se denomina I_a . La hipótesis planteada por el SCS es que se cumple la siguiente igualdad:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad \text{Ecuación 7}$$

Sabiendo que $P = P_e + I_a + F_a$ se llega a la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Ecuación 8}$$

El SCS propone una relación de $I_a = 0.2 \cdot S$ para simplificar el proceso y reducir el número de incógnitas, pero en SWMM5 se mantienen como variables independientes para que el

usuario pueda escoger el valor de retención en superficie. Se define el número de curva (CN) como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ecuación 9}$$

El SCS tabula en CN dándole valores de 0 a 100 en función del tipo y uso del suelo. Por lo tanto, el uso del método del CN en SWMM5 solamente requiere de la estimación del CN para cada sub-cuenca.

5.3.5. MODELO HIDRÁULICO DE TRANSPORTE

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos en SWMM5 está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento tanto para flujo gradualmente variado como para flujo transitorio (es decir, las ecuaciones de Saint Venant). El usuario puede seleccionar el nivel de sofisticación con el que resolver las ecuaciones: flujo uniforme, onda cinemática u onda dinámica.

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad \text{Ecuación 10}$$

Conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_0 - I_f) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde Q es el caudal circulante, A es la sección transversal del conducto ocupada por el flujo de agua, x es la abscisa en la dirección del conducto, t es el tiempo, q el caudal específico, g la aceleración de la gravedad, y el calado, I_0 es la pendiente del conducto e I_f es la pendiente de la línea de energía. Este es un caso de sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, no lineales y de tipo hiperbólico, que carecen de solución analítica.

Flujo permanente uniforme

La aproximación de flujo uniforme representa la forma de cálculo más simple para representar el comportamiento del agua dentro de los conductos. Este tipo de flujo se caracteriza porque las condiciones de velocidad en cualquier punto no cambian con el tiempo y no existen cambios de densidad, presión o temperatura. Por lo tanto, se asume que en cada incremento de tiempo la velocidad media es constante y la línea de energía y la línea de nivel de fondo resultan ser paralelas. El modelo traslada los hidrogramas de entrada en el nodo aguas arriba del conducto hacia el nodo aguas abajo. La relación entre calado y caudal se obtiene por medio de la fórmula de Manning.

$$I = I_f \quad \text{Ecuación 12}$$

Este tipo de cálculo no tiene en cuenta el almacenamiento de agua en conductos, efectos de remanso, resaltos hidráulicos, pérdidas en entradas y salidas, entradas en carga o flujo inverso. Solo puede utilizarse en redes de drenaje en las que cada nodo tenga un único conducto de salida, por lo que no es muy realista. El modelo de flujo uniforme es

independiente de los incrementos de tiempo de cálculo y es solamente apropiado para análisis preliminares y pre-dimensionamiento de redes.

Flujo no permanente uniforme

Este método resuelve la ecuación de continuidad junto con una forma simplificada de la ecuación de la cantidad de movimiento en cada conducto. Esta última requiere que la pendiente de la superficie libre de agua sea igual a la pendiente del conducto; es decir $I_0 = I_f$ (solamente intervienen las componentes de gravedad y fricción).

$$I = I_f \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

El caudal máximo que puede ser evacuado a través del conducto es el caudal a sección llena que se calcula por medio de la fórmula de Manning, excepto si el conducto entra en carga, en cuyo caso el caudal sería mayor. Cualquier exceso de caudal sobre este valor en el nodo de entrada al conducto será perdido por el sistema, saliendo a la calle, o bien podrá acumularse sobre el nodo de entrada y ser reintroducido al conducto cuando haya capacidad disponible en este.

La onda cinemática permite variar temporal y espacialmente al caudal y la sección de flujo en un conducto. Esto puede dar como resultado hidrogramas de salida atenuados y retrasados a medida que los caudales de entrada van siendo modelados a lo largo del conducto, pero esa laminación solamente es numérica. Además, este método tiene algunos inconvenientes ya que no es capaz de tener en cuenta las condiciones de contorno aguas abajo, pérdidas en entradas y salidas, resaltos hidráulicos o el flujo inverso, y sigue estando limitado a nodos de red con una única salida. Por lo tanto, no puede utilizarse en caso de existir en la red elementos de regulación o en redes malladas.

Onda dinámica

El cálculo mediante onda dinámica resuelve las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales (intervienen todas las fuerzas actuantes: gravedad, fricción, presión e inercia) y por lo tanto proporciona los resultados más precisos de los tres métodos propuestos. SWMM5 resuelve el sistema de ecuaciones mediante un esquema de diferencias finitas explícitas que utiliza intervalos de tiempo reducidos con objetivo de asegurar la estabilidad de la solución. Para que el proceso de cálculo sea más rápido, se resuelve de manera simultánea la altura de la lámina libre solamente en los nodos de la red y el valor del caudal solamente en los conductos. Este método de cálculo permite representar el flujo a presión cuando se alcanza en un conducto el caudal a tubo lleno. Cuando la altura de la lámina de agua en un pozo de registro excede la altura máxima de este, el flujo de agua desborda y produce inundación.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA I_f + gA y_L = 0 \quad \text{Ecuación 16}$$

La onda dinámica tiene en cuenta almacenamiento en conductos, efectos de remanso, pérdidas en entradas y salidas de la red, flujo inverso y entradas en carga. Puede aplicarse a cualquier esquema de red de drenaje, tanto en redes malladas como arborescentes. Este es el método adecuado para sistemas sujetos a efectos de remanso a causa de restricciones

aguas abajo y con elementos de regulación de caudales como orificios o vertederos. La contrapartida reside en que los intervalos de tiempo deberán ser considerablemente más reducidos, del orden de 30 segundos o menos.

Otro inconveniente del uso de la onda dinámica son las inestabilidades de cálculo que aparecen con escenarios de flujo complejos. Como solución a estos obstáculos al cálculo SWMM5 ofrece la posibilidad de simplificar los términos inerciales, que acostumbran a ser los más problemáticos en términos de inestabilidad numérica de la solución. SWMM5 permite ponderarlos de manera que se reduzca su importancia en zonas conflictivas o directamente ignorarlos utilizando una aproximación de onda difusiva (en la que intervienen fuerzas de gravedad, fricción y presión hidrostática).

5.3.6. SELECCIÓN DE MODELOS

El modelo hidráulico de transporte utilizado es el de onda dinámica, ya que es el que proporciona resultados más precisos, por lo que se tendrán que elegir incrementos de tiempo lo suficientemente pequeños para que el modelo sea estable. En este caso no se espera que el tiempo de cálculo sea elevado, ya que se trata de un modelo pequeño, por lo que la elección del modelo de onda dinámica no supondrá ceder en este aspecto.

El modelo de infiltración seleccionado es el propuesto por el SCS, por lo que se deberá seleccionar un número de curva para cada sub-cuenca del modelo, en este caso, para cada tejado simulado. La razón por la que se elige este modelo es porque es el más extensamente utilizado y por no ser empírico.

En cuanto al modelo de transformación de lluvia en escorrentía, además de las pérdidas por escorrentía, se tendrá en cuenta las pérdidas por evapotranspiración. Las pérdidas por retención e interceptación no se tendrán en cuenta, ya que se trata de áreas de estudio totalmente impermeables al tratarse de tejados, no existen elementos que puedan interceptar el agua ya que la vegetación de un tejado verde extensivo es de muy poca altura y se considerará que no existen zonas en las que se puedan generar charcos. Las entradas de agua en el sistema serán únicamente por precipitación.

5.4. TÉCNICAS LID CON SWMM5

Las últimas versiones de SWMM5 están incorporando la posibilidad de modelar diferentes tipos de técnicas de drenaje sostenible. Éstas simulan los procesos de retención, infiltración, evapotranspiración y reducción de la carga contaminante en la medida que las diferentes capas que las componen son capaces de llevarlos a cabo. En este trabajo, la herramienta de modelización de técnicas LID (*Low Impact Development*) que ofrece SWMM5 permitirá simular el comportamiento hidráulico de diferentes paquetes de tejado verde.

Las técnicas LID se representan como una combinación de capas verticales cuyas propiedades se definen por unidad de área. Esto permite aplicar LIDs de la misma tipología y características, pero de diferente área en diferentes sub-cuencas. Durante la simulación, SWMM5 lleva a cabo un balance de humedad que monitoriza cuánta agua se mueve entre capas y cuánta agua es almacenada en cada una de ellas para cada intervalo de tiempo. Desde el menú de la pantalla principal de SWMM5, seleccionando la opción "*Hydrology – LID Controls*", podemos crear o editar las diferentes técnicas LID que se van a

utilizar en el proyecto. Posteriormente, en la ventana de características de cada sub-cuenca, se podrá especificar qué área ocupa cada técnica en cada sub-cuenca mediante los “*LID Group Editor*” y “*LID Usage Editor*”. En este capítulo se detalla cómo llevar a cabo cada uno de estos pasos.

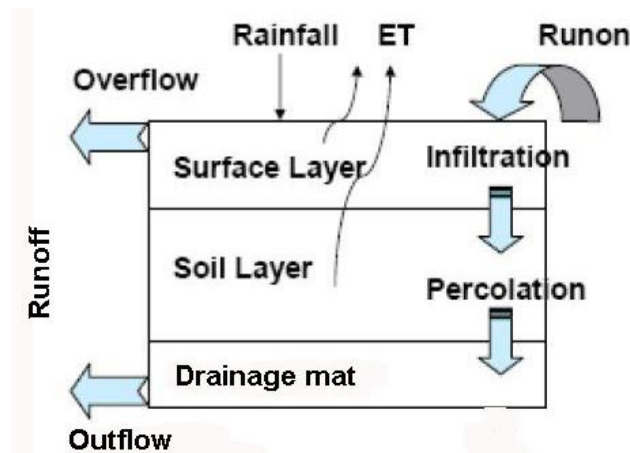


Figura 24: Diagrama conceptual de un paquete de tejado verde

La capa superficial (*Surface Layer*) corresponde a la superficie sobre la que precipita la lluvia y puede generar escorrentía superficial si el tejado verde no es capaz de drenar toda el agua. La capa de sustrato (*Soil Layer*) es una mezcla de sustrato con características especiales sobre la que se plantan las especies vegetales y que permite la filtración del agua. La última capa corresponde con la capa de drenaje (*Drainage mat*) que será la última capa por la que pasará el agua antes de ser vertida al sistema de drenaje.

Existen dos métodos diferentes para ubicar las técnicas LID en una sub-cuenca:

- Situar un LID, o más de uno, en una sub-cuenca existente, lo que hará que la proporción de área no cubierta por LID disminuya.
- Crear una sub-cuenca adicional específicamente para albergar el LID que se desee implementar.

El primer método permite situar un conjunto de diferentes técnicas LID en una misma sub-cuenca, cada una tratando una porción diferente de la escorrentía. Utilizando esta opción se consigue que los diferentes LID actúen en paralelo; no es posible hacerlos actuar en serie, es decir, hacer que el caudal de salida de un LID sea el de entrada en el siguiente. Además, el porcentaje de área impermeable y el parámetro de ancho de la sub-cuenca deberán ser ajustados para compensar el área que ha sido ocupada por LIDs. Este fenómeno se ilustra en la figura a continuación:

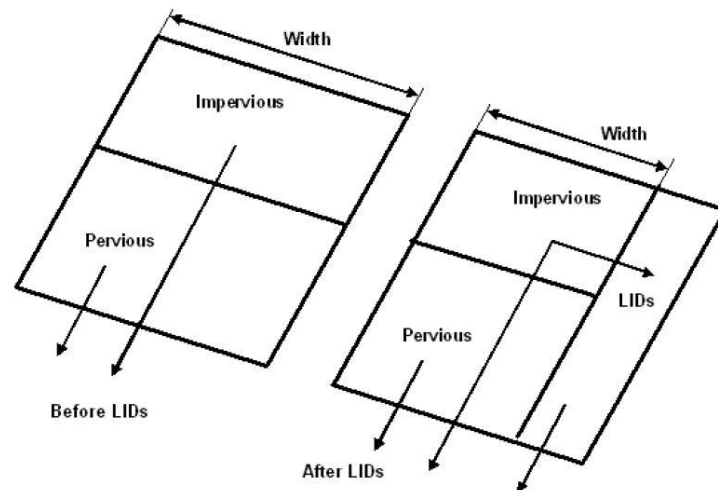


Figura 25: Esquema de implementación de técnicas LID en SWMM5 [28]

El segundo método permite que los LID funcionen en serie, así como derivar la escorrentía generada en una sub-cuenca hacia un LID en concreto. Si las nuevas sub-cuenchas que albergan los LID ocupan el área antes perteneciente a una de las sub-cuenchas originales, se deberán realizar también los ajustes necesarios en los parámetros de ancho, porción impermeable y área de dicha sub-cuenca. Se debe tener en cuenta también que los parámetros que pertenecen al elemento LID tendrán siempre prioridad ante los parámetros estándar a definir en una nueva sub-cuenca; por ello, se pueden obviar estos últimos.

El flujo de salida de los elementos LID, se deriva por defecto al mismo nodo de conexión con la red de alcantarillado que la sub-cuenca de la que forman parte; se considera flujo de salida tanto el flujo por desborde en superficie como el caudal que evacúa un posible dren situado en una de las capas que lo forman. Sin embargo, el usuario puede escoger devolver todo el caudal de salida del LID a las áreas permeables de la sub-cuenca.

SWMM5 ofrece ocho tipos de técnicas LID para aplicar en los proyectos, pero en este caso solo se utilizará una: tejados verdes o *green roofs*. Las otras técnicas LID son: celdas de bio-retención, jardines de lluvia, zanjas de infiltración, pavimentos permeables, pequeños depósitos de lluvia, cunetas verdes y desconexión de las bajantes de los tejados.

Los tejados verdes son aquellos que permiten plantar vegetación en una capa de sustrato con características concretas, que se sitúa sobre una capa drenante de un material capaz de retener el agua de lluvia que cae sobre el tejado. Éstos permiten, por lo tanto, almacenar in-situ el agua de lluvia y transportarla directamente hacia la red de alcantarillado o hacia las áreas permeables circundantes.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

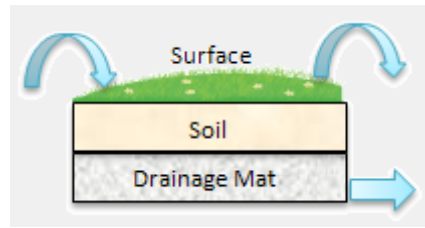


Figura 26: Esquema de una cubierta verde en SWMM5

Por lo tanto, las capas de que dispone un tejado verde en SWMM5 son: superficie, suelo y capa drenante. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie o a través de la capa drenante hacia la red de alcantarillado o áreas permeables.

A continuación, se deberán definir las propiedades de cada una de las capas que conforman ese tipo de LID en concreto. Cada capa consta de varios parámetros que definen su comportamiento.

Capa superficie (“Surface layer”)

Los diferentes parámetros que definen esta capa se describen a continuación:

- **Altura de berma** [mm]: cuando existan bermas o muros de confinamiento, ésta será la altura hasta la cual el agua puede almacenarse en superficie antes de desbordar. Para las desconexiones de bajantes de pluviales, esta altura también será igual a la altura de agua que se puede retener en las posibles depresiones del tejado.
- **Volumen de vegetación**: es la fracción del volumen de almacenamiento del LID que se encuentra rellena de vegetación. Es decir, el volumen que ocupan las raíces y hojas dentro de la capa de suelo, no la superficie de cobertura vegetal. Normalmente es un parámetro que puede ser ignorado, pero en ocasiones puede alcanzar valores de hasta 0.1 o 0.2 para vegetaciones muy densas.
- **Rugosidad de la superficie**: es el número de Manning “n” para flujo en superficie. Tendrá sentido únicamente cuando circule escorrentía sobre la superficie del LID, es decir, cuando se sature el sustrato.
- **Pendiente de la superficie**: Tendrá sentido únicamente cuando circule escorrentía sobre la superficie del LID; por lo tanto, este parámetro solamente se utiliza para pavimentos, superficies de tejados y cunetas verdes.

Capa de suelo (“Soil layer”)

- **Espesor** [mm]: el valor para este parámetro recomendado en el Manual es de 75 a 150 mm.
- **Porosidad** (como ratio): volumen de huecos relativo al volumen total de sólidos.
- **Capacidad de campo** (como ratio): volumen de agua en los poros relativo al volumen total del material una vez se ha dejado drenar totalmente. Por debajo de este nivel, no sucede ningún drenaje vertical de agua a través de la capa de suelo.
- **Punto de marchitez** (como ratio): volumen de agua en los poros relativo al volumen total de material una vez este ha sido bien secado y solamente resta el agua adherida a los granos. El contenido de humedad del suelo no puede bajar de este valor.

- **Conductividad** [mm/h]: se trata de la conductividad hidráulica (permeabilidad) del suelo completamente saturado.
- **Pendiente de conductividad** (adimensional): pendiente de la curva que tiene por abscisas la conductividad en escala logarítmica y por ordenadas el contenido de humedad del suelo. Los valores típicos según el Manual de SWMM5 oscilan entre 30 y 60. Este parámetro puede ser estimado a partir de un análisis del tamaño de grano de la siguiente manera: $0.48 \cdot (\% \text{Arena}) + 0.85 \cdot (\% \text{Arcilla})$.
- **Altura de succión** [mm]: valor habitual para la succión capilar a lo largo del frente mojado. Este parámetro solo será necesario si se ha seleccionado el método de Green Ampt para la infiltración.

Capa drenante (“drainage mat”)

Esta capa hace referencia al material utilizado en los tejados verdes para retener los caudales de lluvia recolectada en origen que percolan a través de la capa de suelo. Se pueden utilizar gran variedad de materiales y formatos drenantes distintos. Los sustratos pueden estar compuestos por mezclas de productos reciclados a base de ladrillos, gravas volcánicas, componentes minerales, áridos, materiales con granulometrías muy variadas y otros materiales especiales para el crecimiento de vegetación. Los parámetros que se utilizan para definir sus propiedades son:

- **Espesor** [mm]: Es la altura de la capa o lámina utilizada. Según el Manual SWMM5 los valores típicos de espesor para esta capa se encuentra entre 25 y 50 mm, los cuales son característicos de tejados verdes extensivos.
- **Fracción de vacíos**: volumen de espacio vacío relativo al volumen total en la capa. El valor para este parámetro recomendado en el Manual es de 0.5 a 0.6.
- **Rugosidad**: es el número de Manning “n” utilizado para calcular el flujo horizontal de agua drenada a través de la capa. Los fabricantes no especifican habitualmente este valor, por lo que deberá ser estimado. El Manual SWMM5 recomienda el uso de un factor relativamente alto, entre 0.1 y 0.4.

5.4.1. APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS LID EN LAS SUB-CUENCAS (“LID GROUP EDITOR”)

Una vez que se ha definido el tipo de tejado verde que queremos analizar se debe asignar a una sub-cuenca. Para ello existe una opción donde se realiza este paso. En cada sub-cuenca aparecerá esta opción que permite especificar cómo un determinado LID creado anteriormente va a ser utilizado en la sub-cuenca en cuestión.

- Se deberá escoger el nombre de uno de los tejados verdes creados anteriormente.
- Se da la opción de seleccionar una casilla que otorga al LID el área total de la sub-cuenca.
- En caso de que el LID no ocupe el área de la sub-cuenca al completo se deberá especificar el área (en m²) que ocupa el tejado verde dentro de la sub-cuenca.
- En el caso de que existiesen más de una unidad de la tipología de LID en la sub-cuenca, se deberá especificar el número concreto de ellas que se desea ubicar.
- Se deberá especificar el ancho de la cara por donde se da el flujo de salida del elemento LID. Este parámetro se aplica en técnicas que usan el flujo en superficie para evacuar la

escorrentía fuera de la unidad LID. Para otros elementos LID este parámetro tendrá un valor de 0.

- El porcentaje de área impermeable de la sub-cuenca que va a tratar el LID. Si la unidad solamente actúa en origen, como en el caso de un tejado o una desconexión, el valor que se le dará al parámetro es 0.
- Se deberá proveer el nombre del nodo o sub-cuenca que recibirá el flujo de salida del LID. Se puede dejar en blanco en el caso de el objeto de destino es el mismo que el de la sub-cuenca donde se encuentra el LID.

6. CARACTERÍSTICAS DEL CASO DE ESTUDIO

Hasta el momento se han descrito los beneficios de las técnicas LID, y con más detalle, los de los tejados verdes, así como los aspectos que se deben tener en cuenta. El siguiente paso es analizar el comportamiento hidrológico de diferentes paquetes de tejado verde en el área metropolitana de Barcelona.

En este apartado se explicarán las características específicas del caso de estudio, datos de partida utilizados, hipótesis realizadas en el modelo y características de los paquetes de tejado verde simulados.

Se han querido realizar dos tipos de simulaciones: simulación continua de un año estándar y una simulación por eventos aislados de lluvia asociados a un periodo de retorno específico. En ambos casos la simulación se ha realizado para tres paquetes diferentes de tejado verde y para una cubierta convencional, de tal manera que se pueda realizar una comparación de los resultados que se obtengan.

El objetivo de la simulación continua es hacer un cómputo anual de la reducción de escorrentía superficial que suponen los tejados verdes y comprobar el efecto de la evapotranspiración, ya que para que ésta tenga un efecto notable se debe tener en cuenta a largo plazo. Esta simulación permitirá tener en cuenta la pluviometría torrencial característica de la zona, ya que los datos de lluvia son datos reales que pueden considerarse como un año estándar. También será interesante analizar los eventos de lluvia con mayores intensidades que se dan en la serie anual para observar la reducción de caudales pico en comparación con una cubierta convencional.

En relación a la simulación de los eventos aislados, se ha realizado un modelo para cada periodo de retorno asociado. El periodo de retorno máximo elegido es de 10 años, ya que el dimensionamiento de la red de drenaje urbano de la mayoría de las ciudades se hace para este periodo de retorno, y en el caso de Barcelona esto se cumple. El objetivo del análisis de eventos aislados es observar el comportamiento hidráulico de los diferentes paquetes de tejado verde durante eventos extremos observando la reducción de caudal pico, el retraso que tarda en ocurrir y la reducción de volumen total de escorrentía.

Además, para el caso de los eventos aislados también se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros más importantes asociados al sustrato de un tejado verde. Este análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo para el caso de eventos aislados ya que el tiempo computacional del modelo es notablemente inferior al de la simulación continua y para observar la influencia que tienen los parámetros del sustrato en el comportamiento hidráulico de un paquete de tejado verde no es necesario analizar un año pluviométrico completo.

6.1. PLUVIOMETRÍA

En primer lugar, para definir las características de la pluviometría en el caso de estudio se debe diferenciar los dos tipos de modelos que se han llevado a cabo. Se ha realizado una simulación de eventos de lluvia aislados asociados a un periodo de retorno determinado y una simulación continua de una serie anual de lluvia.

Para el caso de estudio de eventos aislados, se han obtenido lluvias de diseño asociadas a cada uno de los periodos de retorno estudiados a partir de curvas IDF.

En el caso de la simulación continua, uno de los aspectos a la hora de seleccionar las diferentes localizaciones a analizar ha sido la posibilidad de disponer de series pluviométricas anuales registradas cada cinco minutos, ya que como se ha explicado en apartado 2. *Hidrología Urbana*, la escala temporal a la hora de analizar cuencas urbanas es mucho menor a la utilizada en la hidrología convencional, pasando de intervalos de tiempo de horas en cuencas naturales a minutos en cuencas urbanas. Ha sido posible obtener datos registrados cada cinco minutos durante un año en dos localizaciones diferentes: Barcelona y Granollers.

Tradicionalmente se ha dado por supuesto que la distribución espacial de la lluvia sobre pequeñas áreas es uniforme, sin embargo, se ha demostrado que esta hipótesis no es cierta incluso para áreas pequeñas y más aún en zonas de clima mediterráneo, caracterizado por la gran variabilidad espacial. En el caso de Barcelona y Granollers, la variabilidad en la pluviometría es notable, ya que en ocasiones se producen precipitaciones en una de las localizaciones mientras que en la otra no. Esta diferencia climática de las precipitaciones entre las dos poblaciones se debe a que Barcelona se encuentra directamente en contacto con el mar Mediterráneo y protegida por las montañas de la Sierra de Collserola, mientras que Granollers se encuentra en el interior protegida por las montañas de Serralada de Marina, lo que hace que en Granollers la pluviometría acumulada media anual sea ligeramente inferior a la de Barcelona. Ésta ha sido la razón por la que se han analizado las dos localizaciones para estudiar el comportamiento de un tejado verde.

Las localizaciones exactas de las estaciones meteorológicas de las que se han obtenido los datos son:

- Pluviometría del año 2010 medida en el observatorio meteorológico de Fabra, Barcelona. Altitud 408m - Latitud: 41° 25' 6" N - Longitud: 2° 7' 27" E.
- Pluviometría del año 1988 medida en la estación meteorológica de Granollers. Altitud: 145 m - Latitud: 41° 36' 28" N - Longitud: 2° 17' 10" E.

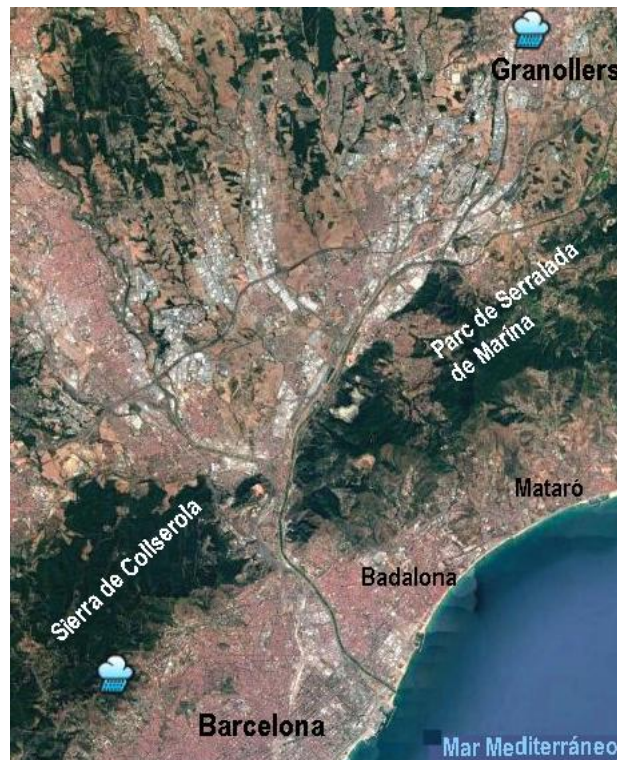


Figura 27: Localización de los datos pluviométricos registrados

En el caso de Barcelona el registro de pluviometría corresponde al año 2010 con una precipitación anual acumulada de 539.8 mm, por lo que se puede afirmar que representa un año estándar, ya que la precipitación media anual en Barcelona se estima en unos 500 mm anuales. Para el caso de Granollers, la precipitación anual es parecida y en el caso de los datos disponibles asociados al año 1988, la precipitación total es de 523.75 mm.

6.2. CARACTERÍSTICAS CUBIERTAS

En este apartado se definen las características de los tres paquetes de tejado verde estudiado que definen su comportamiento hidrológico. También se define la sobrecarga que supone cada paquete de tejado verde.

6.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PAQUETES DE TEJADO VERDE

A la hora de seleccionar las características de los paquetes de tejado verde que se querían estudiar, se ha realizado una revisión bibliográfica de los parámetros asociados tanto a la capa drenante, sustrato y vegetación más comunes y recomendados por los manuales. También se han tenido en cuenta los valores que los fabricantes y empresas locales dedicadas a implantar este tipo de sistemas proporcionan.

Los parámetros que el software SWMM5 permite seleccionar para caracterizar cada paquete de tejado verde están asociados a la capa drenante (espesor, volumen de poros y rugosidad de Manning), al sustrato (espesor, porosidad, capacidad de retención, punto de marchitez, conductividad, pendiente de la conductividad y altura de succión) y a la superficie del tejado (altura de berma, volumen de vegetación, rugosidad de la superficie y la pendiente de la cubierta). Los parámetros que dominan el comportamiento hidrológico de un tejado verde son los asociados a sustrato, en especial el espesor, la capacidad de retención y la conductividad o permeabilidad. Además, no todos los parámetros serán

necesarios según el modelo de infiltración que se utilice, así, por ejemplo, la altura de succión es un parámetro que solo se utiliza en el caso del modelo Green-Ampt, por lo que en este caso no será necesario ya que el modelo de infiltración utilizado es el de Número de Curva.

La capacidad de retener agua de un sustrato y por tanto capacidad para reducir volumen de escorrentía, dependerá de la capacidad de retención del mismo y será siempre inferior a la porosidad. La capacidad de detención estará ligada directamente con el espesor, ya que, a mayor espesor, mayor volumen de retención tendrá un sustrato. La permeabilidad influye en la detención del agua, o lo que es lo mismo en la capacidad para retrasar el caudal máximo de escorrentía.

Para definir las características geométricas de la cubierta de estudio se ha tomado como ejemplo el edificio D1 del Campus Nord de la Universidad Politécnica de Barcelona.

El área es de 738 m², y un ancho de 57 m. La pendiente es del 1%, por lo que podría decirse que es prácticamente plana. Se ha indicado que la cubierta es completamente impermeable y no existen zonas de posible encharcamiento. La altura de berma se ha tomado como 25 mm pero se debe tener en cuenta que siempre tiene que tener una altura superior al sustrato para protegerlo del viento y evitar el desprendimiento del sustrato. El valor de rugosidad de Manning para las cubiertas vegetales se ha tomado 0.41, tomando como referencia el estudio realizado por A. Palla, C. Berretta, L.G. Lanza y P. La Barbera [29]. El valor del volumen de vegetación recomendado por el Manual de SWMM5 es de entre 0.1 – 0.2, en este caso se ha tomado el valor medio 0.15.

A la hora de fijar las características de la capa drenante se ha tenido en cuenta cumplir con las recomendaciones del manual de SWMM5 a partir de las características de capas existentes en el mercado. Se ha utilizado el catálogo de la empresa ZINCO [21] para tomar los valores que a continuación se definen. El grosor de la capa drenante según el manual debe estar entre 25 – 50 mm y los valores según los diferentes productos que ofrece ZINCO están entre 25 – 15 mm, finalmente se ha optado por un espesor de 15 mm. La fracción de huecos debe ser de aproximadamente 0.5 – 0.6 según el Manual, en cambio, los valores encontrados en el mercado han sido de 0.3, el valor adoptado ha sido de 0.5. El último parámetro de la capa drenante que queda por definir es el coeficiente de rugosidad de Manning que puede estar comprendido entre 0.1 – 0.4, el valor adoptado ha sido de 0.2.

En cuanto a las características del sustrato, es la capa que definirá el comportamiento hidrológico del tejado verde, por lo que se han buscado más referencias. El parámetro principal que diferenciará una cubierta verde de otra es el espesor. En este caso se han estudiado tres paquetes de tejado verde con espesores inferiores a 200 mm para cumplir con las características de las cubiertas extensivas. Los tres espesores que se han estudiado son: 100, 150 y 200 mm.

El manual de SWMM5 recomienda unos valores de las características de sustrato según el material utilizado, es decir, si es material arenoso o arcilloso. Los sustratos específicos para cubiertas vegetales suelen ser muy porosos y permeables, por lo que el valor por defecto de la porosidad que propone el programa es de 0.5. El estudio realizado por A. Palla, C. Berretta, L.G. Lanza y P. La Barbera [29] propone un valor de porosidad de 0.64. Por otro lado, el estudio realizado por Simon De-Ville, Manoj Menon, Xiaodong Jia, George Reed y

Virginia Stovin [30] propone valores comprendidos entre 0.33 – 0.46 dependiendo de los materiales de los que esté compuesto el sustrato. El manual CIRIA [17] simplemente recomienda que este valor sea superior a 0.1. Finalmente, el valor adoptado para la porosidad ha sido de 0.4, aunque en el análisis de eventos aislados se ha realizado un estudio de sensibilidad de este parámetro.

En referencia a la capacidad de campo o capacidad de retención, al igual que la porosidad el manual de SWMM5 propone diferentes valores según el tipo de material del sustrato, pero por defecto el valor que impone es de 0.2 (en volumen de fracción) y siempre este valor no podrá ser superior a la porosidad. El manual del CIRIA propone valores de entre 0.2 – 0.65. El estudio realizado por A. Palla, C. Berretta, L.G. Lanza y P. La Barbera [29] propone un valor de 0.29 y el estudio realizado por Simon De-Ville, Manoj Menon, Xiaodong Jia, George Reed y Virginia Stovin [30] propone valores comprendidos entre 0.21 – 0.33. En el catálogo de sustratos de la empresa ZINCO [21] los valores propuestos oscilan entre 0.28 – 0.5. Finalmente, el valor adoptado ha sido de 0.27, aunque al igual que con la porosidad, se ha realizado un estudio de sensibilidad de este parámetro.

La siguiente característica que influye de forma notable en el comportamiento hidrológico de una cubierta vegetal es la conductividad o permeabilidad (con unidades de mm/h) que es responsable de la capacidad de detención. Los valores recomendados por SWMM5 oscilan entre 0.25 - 118 mm/h; la normativa alemana *FLL: Forschungsgesellschaft Landsentwicklung Landschaftsbau* simplemente recomienda que este valor sea superior a 0.36 mm/h. El manual CIRIA recomienda valores comprendidos entre 21.6 – 4200 mm/h. Los valores asociados a los sustratos de los que dispone la empresa ZINCO se han considerado de varios órdenes de magnitud muy por encima de los valores encontrados en toda la bibliografía, oscilando de 18 – 24000 mm/h. Finalmente, el valor impuesto a las cubiertas verdes estudiadas ha sido de 50 mm/h, es un valor que cumple las restricciones de la normativa alemana y está dentro de los valores sugeridos por SWMM5. No se han tomado valores mayores ya que se ha considerado que una permeabilidad de más de 200 mm/h son valores muy altos y poco realistas.

Los parámetros que faltan por definir tienen menor importancia en el comportamiento hidrológico. El punto de marchitez de las plantas recomendado por el programa es de 0.1 y el propuesto por A. Palla, C. Berretta, L.G. Lanza y P. La Barbera [29] es de 0.05, en este caso el valor utilizado ha sido de 0.1. La altura de succión no tendrá importancia en el modelo ya que solo es necesaria en el caso de utilizar el modelo de infiltración Green-Ampt, por lo que se ha dejado el valor por defecto de 3.5 mm.

Es posible constatar que los valores de porosidad, capacidad de retención y permeabilidad para sustratos específicos de tejados verdes son altos en comparación con terrenos naturales. Esto se debe a que se diseñan pensando en maximizar sus beneficios en relación al comportamiento hidráulico.

A modo de resumen se indican las características que definen los paquetes de tejado estudiados. Serán tres los paquetes que se estudien, todos con las mismas características de sustrato, pero con espesores diferentes: 100, 150 y 200 mm.

Capa	Característica	Unidades	Valor
Superficie	Altura de berma	mm	25
	Volumen vegetación	Fracción	0.15
	Rugosidad Manning		0.4
	Pendiente	%	1
Sustrato	Grosor	mm	Variable (100, 150, 200)
	Porosidad	vol. Frac.	0.4
	Capacidad	vol. Frac.	0.27
	Punto de marchitez	vol. Frac.	0.1
	Conductividad	mm/h	50
	Pendiente conductividad		45
	Altura de succión	mm	3.5
Capa drenaje	Grosor	mm	25
	Fracción de huecos	Fracción	0.3
	Rugosidad Manning		0.25

Tabla 14: Características de los paquetes de tejado verde

6.2.2. SOBRECARGAS

Uno de los mayores retos que suponen las cubiertas vegetales es poder implantarlos en edificios ya construidos y que éstos se puedan adaptar para poder soportar la sobrecarga que estos sistemas suponen al edificio. La carga máxima permitida sobre una cubierta es la calculada a partir de la *DB-SE-AE: Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación* y que puede soportar la estructura de la edificación, según situación geográfica y la de su uso. Las cargas dinámicas producidas por el viento se deben estimar de acuerdo a la misma normativa anteriormente citada.

Para el caso de las cubiertas extensivas, que es el que interesa en este trabajo, según la NTJ-11E, el peso propio de una cubierta ecológica extensiva en seco es de 40 kg/m² como mínimo, y de 120 – 150 kg/m² a máxima capacidad de agua. Para calcular exactamente la carga de una cubierta se debe disponer de datos indicados por el fabricante. A continuación se analizará la sobrecarga que supone cada uno de los paquetes de tejado verde propuestos a partir de los valores propuestos en el Anejo II de la NTJ-11I y los valores indicados en el catálogo de la empresa ZINCO.

La Normativa de Tecnológica de Jardinería propone diferentes valores de peso para la capa drenante de una cubierta vegetal en función del material utilizado (gravas, arena o sintéticos). En el caso de utilizar gravas, arenas o una mezcla de ambas el peso oscilará entre los 19 – 18 kg/m², pero en este caso se ha decidido tomar valores de las bandas drenantes que propone ZINCO, con un peso de entre 2 – 1 kg/m² y una capacidad de retención que se deberá tener en cuenta a la hora del cálculo a máxima capacidad de entre 3 – 27 l/m². En el caso de disponer de una capa anti-raíces, ésta tiene un peso de entre 0.32 – 1.13 kg/m². El valor de carga de las mantas retenedoras es de entre 0.32 – 1.6 kg/m² con una capacidad de retención de entre 3 – 10 l/m².

El peso que supone la vegetación de acuerdo a la NTJ-11I para plantas herbáceas es de entre 5 – 10 kg/m². Para calcular el peso que supone el sustrato se darán valores de densidad para poder calcular el peso en función del espesor. De acuerdo a la NTJ-11I, el sustrato en seco tiene densidades de ente 0.6 – 1.3 g/cm³ y saturado 1 – 1.8 g/cm³.

En la siguiente tabla se hace un resumen de los valores adoptados para los paquetes de tejado verde:

Banda drenante	Peso	1 kg/m ²
	Retención	3 l/m ²
Mantas retenedoras	Peso	0.85 kg/m ²
	Retención	3.3 l/m ²
Anti-raíces	Peso	0.7 kg/m ²
Vegetación	Peso	7 kg/m ²
Sustrato	Seco	0.95 g/cm ³
	Saturado	1.4 g/cm ³

Tabla 15: Pesos de las capas de un paquete de tejado verde

Una vez definidos los pesos de cada uno de los componentes del paquete de tejado verde se calcula el peso total que supone cada paquete en tres situaciones diferentes: sustrato seco, sustrato saturado y sustrato anegado, es decir, encharcado hasta la altura de la berma. Para el cálculo del peso, cuando el paquete de tejado verde se encuentra saturado se ha calculado a partir de la porosidad del sustrato en vez de utilizar la densidad del sustrato saturado, la porosidad de todos los paquetes es de 0.4. En la siguiente tabla se indica la carga por metro cuadrado que supone cada uno de los tres paquetes de tejado verde estudiados según su espesor.

Espesor [mm]	Seco [kg/m ²]	Saturado [kg/m ²]	Anegado [kg/m ²]
200	200	286	311
150	153	219	244
100	105	151	176

Tabla 16: Peso de cada paquete de tejado verde

Se debe resaltar la importancia de que supone un paquete de tejado verde para la sobrecarga del edificio. Se estima que en la peor condición posible y con un sustrato de 200 mm de espesor, la sobrecarga en la cubierta podría alcanzar las 3 t/m². Este factor tomará gran importancia a la hora de implantar un sistema de tejado verde. Además, se deben tener en cuenta las sobrecargas por uso especificadas en la *DB-SE-AE: Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación* y que anteriormente se han nombrado en el apartado: 4.3.10 *Capacidad estructural*. Se recuerdan en la siguiente tabla las sobrecargas que deben de tenerse en cuenta:

Cubierta solamente accesible para su conservación	100 kg/m ²
Cubierta de uso privado	150 kg/m ²
Cubierta de uso público	(según el uso)

Tabla 17: Sobrecargas debidas al uso

7. EVENTOS AISLADOS

En este primer estudio se ha analizado el comportamiento de los diferentes paquetes de tejado verde para diferentes eventos de tormenta aislados asociados a un periodo de retorno determinado. El objetivo es analizar el comportamiento hidráulico y conocer el porcentaje de reducción de volumen de escorrentía en comparación con un tejado convencional, así como la reducción del caudal pico y el retraso que tarda en producirse dicho caudal pico. También se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros más influyentes en el comportamiento hidráulico de un tejado verde.

Se han tenido en cuenta tres eventos correspondientes a tres periodos de retorno diferentes: 2 años, 5 años y 10 años. En los tres casos se ha tenido en cuenta la evapotranspiración, tomando un valor medio anual, aunque cabe decir que, en un evento de corta duración, el efecto de la evapotranspiración será despreciable, en el apartado de resultados se comentará la influencia sobre el comportamiento hidráulico.

En los siguientes apartados se explica cómo se han llevado a cabo estos cálculos, se exponen los resultados y finalmente las conclusiones.

7.1. PLUVIOMETRÍA

Los datos de pluviometría asociados a cada evento se han calculado a partir de tormentas de diseño. Para el cálculo del hietograma de la lluvia de diseño se necesitan curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la zona. En este trabajo se va a utilizar la curva IDF propuesta por Casas & Redaño (1995) [31]:

$$I(t, T) = \frac{19 \cdot \log T + 23}{(13 + t)^{0.87}} \quad \text{Ecuación 17}$$

En la que la intensidad de precipitación I se expresa en mm/min, la duración t en minutos y el periodo de retorno T en años.

Las curvas de IDF representan un nivel de información global referente al comportamiento pluviométrico de una zona. Su construcción se realiza analizando los registros de todas las tormentas y sus periodos más intensos de precipitación. Estas intensidades se ordenan para cada uno de los periodos de tiempo considerados en función de su valor, realizando un tratamiento estadístico de los datos y asignando periodos de retorno. Los resultados se presentan en forma de curva, pudiéndose ajustar alguna expresión de tipo analítico. Dado que las curvas IDF recogen una información histórica de la pluviometría de la cuenca, pueden ser un punto de partida para construir a partir de ellas la lluvia de proyecto [3].

Como ya se ha adelantado, los periodos de retorno seleccionados para este estudio han sido 2, 5 y 10 años ya que los eventos asociados serán eventos que ocurrirán en Barcelona con una frecuencia importante. Se ha decidido tomar 10 años como el mayor periodo de retorno ya que la red de drenaje barcelonesa está diseñada con este periodo de retorno. En la siguiente figura se representan las curvas IDF obtenidas:

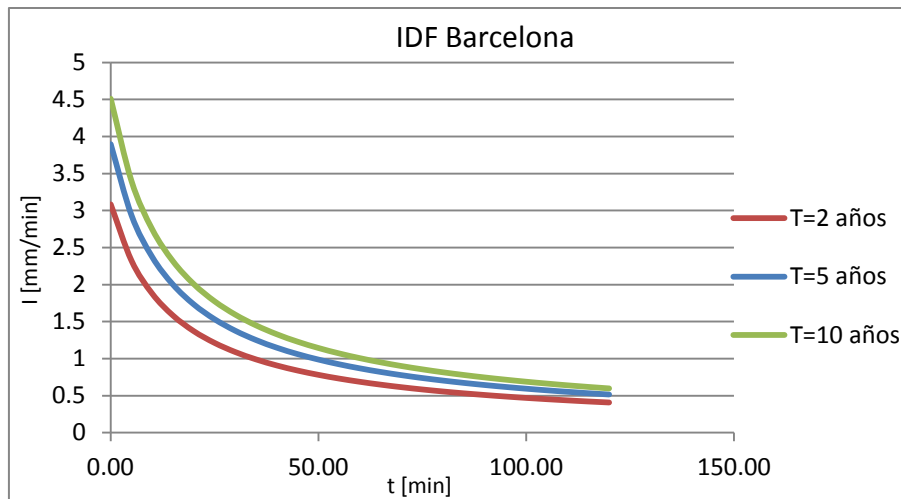


Figura 28 : Curvas IDF asociadas a cada periodo de retorno

Una vez se ha calculado la curva IDF se debe escoger la duración del evento de lluvia y el incremento de tiempo de cada bloque del hietograma. Se utilizará una duración del evento de lluvia de 2 horas y un incremento de tiempo de cada bloque de 5 minutos. Una vez definida la duración del evento y el incremento de bloque del hietograma, el siguiente paso es distribuir cada intensidad de lluvia asociada a cada incremento de tiempo. Existen numerosas distribuciones como lluvia constante o rectangulares, tormenta triangular, tormenta tipo Sifalda, lluvia tipo Keifer-Chu, lluvias de doble triángulo, o la más extendida y la que se utilizará en este trabajo: distribución de bloques alternados.

Existen también distribuciones temporales de intensidades de precipitación asociadas a patrones de precipitación específicos de una zona geográfica concreta, en la que a partir de eventos de lluvia asociados, se obtiene un patrón de precipitación. En cualquier caso, no se debe perder de vista que estas distribuciones provienen de un análisis estadístico de datos reales de zonas concretas, por lo que utilizarlas para otras zonas puede ser una fuente de error. Al no disponer de patrones de precipitación para el área de Barcelona, como ya se ha mencionado, se utilizará una distribución de bloques alternados.

El método de los bloques alternados es el más extendido para obtener una lluvia de diseño a partir de una curva IDF. El hietograma producido por medio de este procedimiento, especifica la precipitación en un número n de intervalos de tiempo Δt , para una lluvia de duración total $Td = n \cdot \Delta t$. Una vez seleccionado el periodo de retorno seleccionado, se toman los datos de intensidad de precipitación de la curva IDF para duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$... así como la precipitación total obtenida multiplicando las intensidades por las duraciones de lluvia. Se trata de estimar los intervalos más desfavorables de precipitación.

La intensidad de lluvia del primer bloque será la máxima intensidad posible en 5 minutos. El segundo bloque tendrá en cuenta la máxima intensidad de lluvia asociada a un evento de 10 min; para ello se calcula el volumen de precipitación asociado a esos 10 min, multiplicando intensidad por duración, y a este valor se le resta el volumen de precipitación de 5 min. El resultado se divide por 5 min para obtener de nuevo un valor de intensidad. Este proceso se repetirá hasta llegar a las dos horas de duración total de lluvia. Los bloques generados se pueden distribuir de acuerdo al aspecto de los hietogramas de la zona o en caso de no tenerlos, distribuirlos de forma alternada alrededor del bloque

central. Los hietogramas obtenidos para los diferentes períodos de retorno se muestran a continuación:

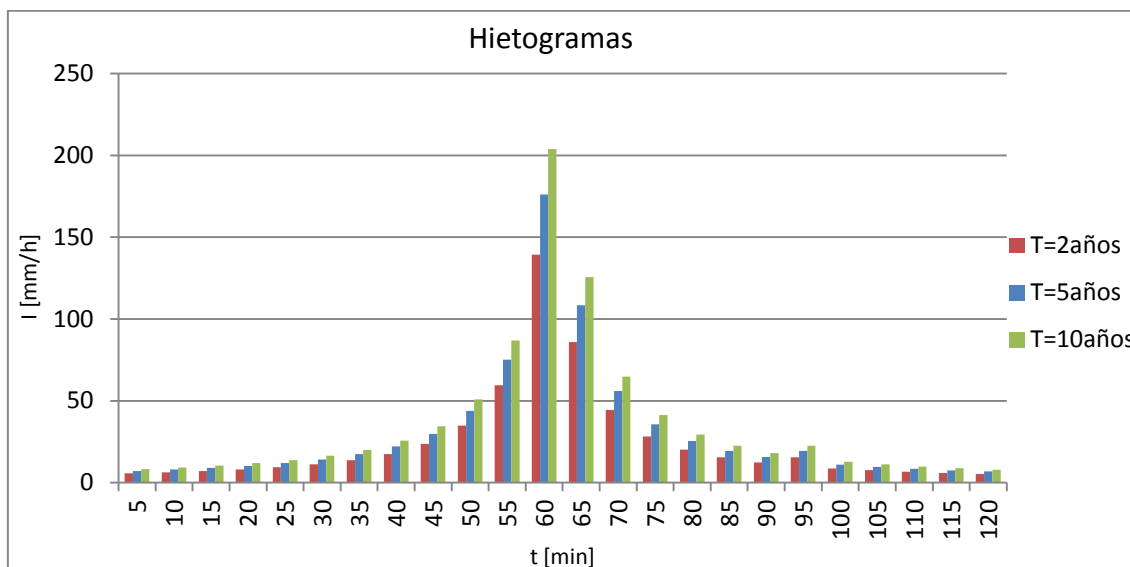


Figura 29: Hietogramas de diseño

De la figura anterior se observan grandes diferencias entre la intensidad máxima y la mínima y que estas intensidades máximas ocurren en intervalos de tiempo muy reducidos. Durante los 15 minutos de lluvia de máxima intensidad cae el mismo volumen de agua que en el tiempo restante. Se podría decir que estas tormentas de diseño representan las características pluviométricas del clima mediterráneo en referencia a las tormentas torrenciales.

7.2.RESULTADOS PARA DIFERENTES GROSORES

Se entiende que el parámetro más importante que describe el comportamiento hidrológico de una cubierta verde será el grosor. Por esta razón, se han simulado los tres paquetes de tejado descritos en el apartado 6.2.1 *Características de los paquetes de tejado verde*.

Como recordatorio, se han mantenido todos los parámetros iguales para los tres tejados verdes estudiados modificando únicamente el grosor. Esta característica, junto con la capacidad de retención y la permeabilidad del sustrato, son las más determinantes del funcionamiento de un tejado verde.

Se han analizado tres grosores: 100 mm, 150 mm y 200 mm. Los resultados obtenidos se han comparado con el funcionamiento de un tejado convencional. Cada paquete de tejado verde se ha simulado con los eventos de lluvia asociados a los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años. En los siguientes apartados se muestran los resultados gráficos obtenidos de cada cubierta y su comparación, así como los valores de caudal pico y coeficiente de escorrentía asociado a cada cubierta para cada caso.

La nomenclatura que se ha utilizado es la siguiente: *CV1-200mm* hace referencia al paquete de cubierta vegetal de 200 mm de espesor; *CV2-150mm* cubierta vegetal de 150 mm de espesor; *CV3-100mm* cubierta vegetal de 100 mm de espesor; *C.Convencional* será la cubierta convencional.

En cuanto a los resultados P_T es la precipitación total del evento; t_{pico} el tiempo en el que ocurre el caudal pico; E_T escorrentía total; E_p caudal pico de escorrentía; ET la evapotranspiración y E_{coef} es el coeficiente de escorrentía.

7.2.1. $T = 2$ AÑOS

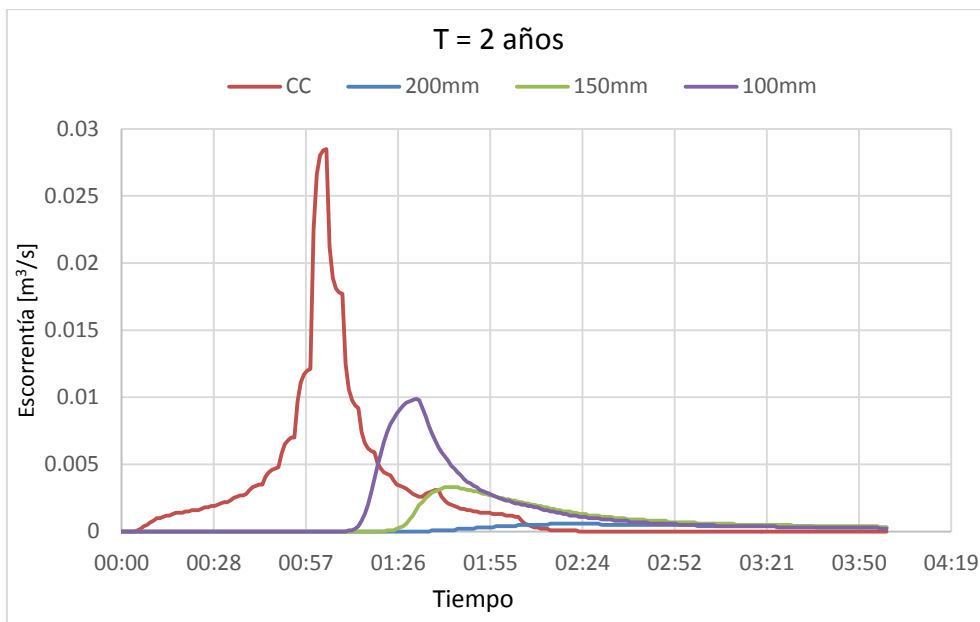


Figura 30: Cálculo de eventos aislados. Precipitación T=2años

Cubierta	P_T [mm]	t_{pico} [h]	E_T [mm]	E_p [m³/s]	E_{coef}	ET [mm]
CV1-200mm	49.36	02:14	4.69	0.0006	0.095	0.12
CV2-150mm	49.36	01:41	15.38	0.0033	0.312	0.12
CV3-100mm	49.36	01:32	27.39	0.0099	0.555	0.12
C. Convencional	49.36	01:04	49.26	0.0285	0.998	0.10

Tabla 18: Características de la escorrentía para diferentes espesores de sustrato. T=2años

Se observa con claridad la disminución del pico de escorrentía que produciría un tejado verde en comparación con el que produciría un tejado convencional. También se aprecia un retraso significativo en el tiempo en el que se produce el pico. Esta última observación es importante, ya que retrasaría el tiempo que tardaría el agua caída en el tejado en llegar a las calles y por tanto permitiendo que la red de drenaje evacúe primero el agua de escorrentía caída directamente sobre las calles.

Con un espesor de sustrato de 200 mm el agua de lluvia de una tormenta asociada a un periodo de retorno de dos años es retenida prácticamente toda, solo el 9.5% se convertirá en escorrentía. Además el pico de escorrentía se producirá ya finalizado el evento de lluvia.

Con un espesor de 150 mm solo el 31.2% del agua de lluvia se convertiría en escorrentía y los mayores caudales se retrasarían 37 minutos respecto a un tejado convencional. En el caso de un sustrato de 100 mm de espesor, el 55.5% de agua caída se transformaría en escorrentía y el pico se retrasaría 28 minutos respecto al pico producido en un tejado sin sustrato.

7.2.2. $T = 5$ AÑOS

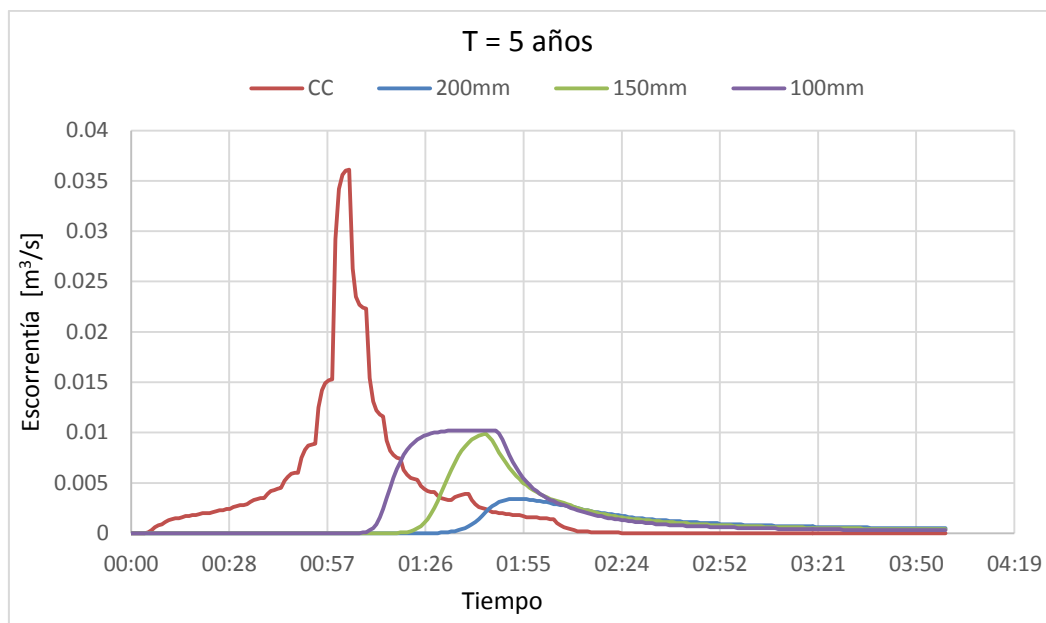


Figura 31: Cálculo de eventos aislados. Precipitación $T=5$ años

Cubierta	P_T [mm]	t_{pico} [h]	E_T [mm]	E_p [m³/s]	E_{coef}	ET [mm]
CV-200mm	62.36	01:51	15.92	0.0034	0.255	0.13
CV2-150mm	62.36	01:44	28.17	0.0099	0.452	0.13
CV3-100mm	62.36	01:33	40.28	0.0102	0.646	0.13
C. Convencional	62.36	01:04	62.26	0.0361	0.998	0.10

Tabla 19: Características de la escorrentía para diferentes espesores de sustrato. $T=5$ años

Para el caso de un evento de lluvia asociado a un periodo de retorno de 5 años se observa un comportamiento de los tejados muy parecido al comportamiento frente a un evento con periodo de retorno de 2 años. Se observa una reducción notable del pico de escorrentía y un retraso en el tiempo de que tarda en producirse.

Como era de esperar, la mayor reducción de volumen de escorrentía y de caudal pico se produce en el tejado con un espesor de sustrato de 200 mm. Solamente el 25.5% del agua caída se convertiría en escorrentía, reduciendo el pico a 3.4 l/s y retrasándolo 47 minutos. Podría decirse que en este caso tampoco sería necesario un espesor de esta magnitud.

Para el caso de un espesor de 150 mm, la escorrentía será tan solo el 45.2% de la precipitación, se reduce prácticamente a la mitad. El pico también se reduce considerablemente a 9.9 l/s y se retrasa en el tiempo 40 minutos.

Para un espesor de 100 mm la retención será menor, tan solo el 35.4% de la precipitación total será retenida por el sustrato. El pico se reducirá de 36.1 l/s a 10.2 l/s y se retrasará 29 minutos. En este caso se observa como el caudal pico de escorrentía, aunque se disminuye y se retrasa, se mantiene en el tiempo hasta que el tejado empieza de nuevo a disminuir los caudales que evacúa. Esto quiere decir que durante ese periodo el suelo está completamente saturado y el agua está acumulada sobre el sustrato hasta que la lluvia cesa y el sustrato es capaz de drenar toda el agua. Hay que tener en cuenta que se ha impuesto una altura de berma de 25 mm, por lo que en el caso de que la altura del sustrato

más la altura alcanzada por el agua acumulada alcanzase este nivel, el agua rebosaría por el tejado y vertería directamente el agua a la calle. Este hipotético caso supondría que el sistema de drenaje del tejado quedaría superado.

7.2.3. $T = 10$ AÑOS

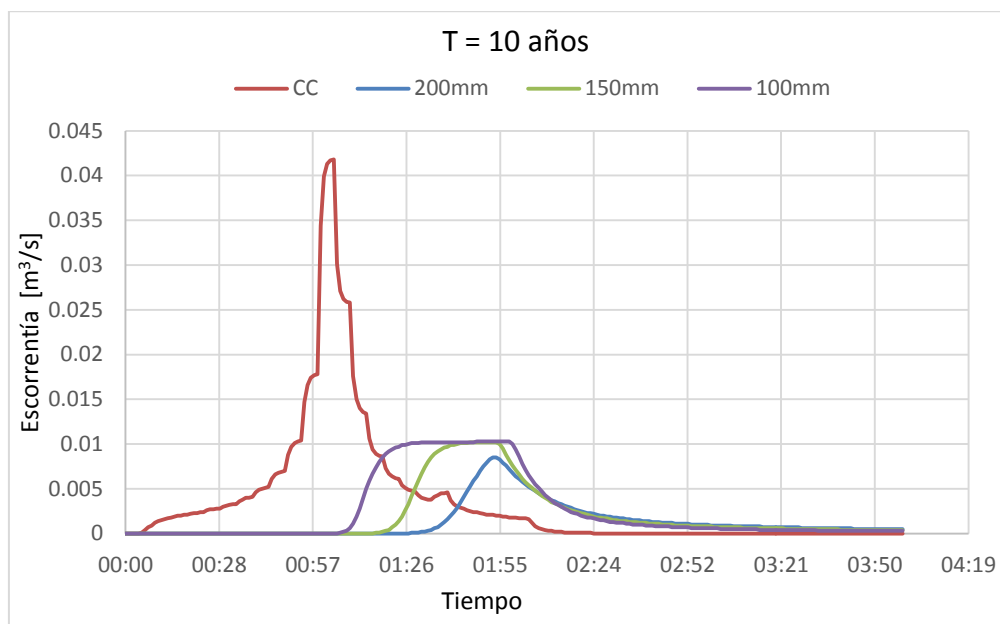


Figura 32: Cálculo de eventos aislados. Precipitación $T=10$ años

Cubierta	P_T [mm]	t_{pico} [h]	E_T [mm]	E_P [m³/s]	E_{coef}	ET [mm]
CV-200mm	72.19	01:53	25.45	0.0086	0.353	0.14
CV2-150mm	72.19	01:46	37.88	0.0102	0.525	0.14
CV3-100mm	72.19	01:31	50.01	0.0102	0.693	0.14
C. Convencional	72.19	01:04	72.09	0.0418	0.999	0.10

Tabla 20: Características de la escorrentía para diferentes espesores de sustrato. $T=10$ años

Para este caso, donde la intensidad de precipitación es la máxima de los eventos de lluvia estudiados, se observa una reducción del caudal pico de escorrentía producido por los tejados verdes en comparación con el tejado convencional. También se produce un retraso en el tiempo en el que se producen los caudales picos y una reducción de volumen total de escorrentía. En este caso se constata que para los tejados con un sustrato de espesor 100 mm y 150 mm el suelo se llega a saturar, ya que, en ambos casos, aunque en tiempos diferentes, el caudal pico es igual a la capacidad de infiltración del sustrato, esto quiere decir que el suelo se satura y se empieza a acumular agua sobre el terreno y solo puede ser evacuada a la velocidad máxima que es capaz de pasar el agua a través de las partículas del sustrato es decir, su permeabilidad.

En este caso, para un espesor de 200 mm el volumen de escorrentía se reduce en un 64.7%, el caudal pico disminuye 33.2 l/s y se retrasa 49 minutos. Por lo que para este caso este espesor de sustrato está funcionando a un rendimiento más que aceptable.

Para los espesores de 150 y 100 mm el volumen total de escorrentía se reduce un 47.5% y un 30.7% respectivamente. Los caudales pico en ambos casos son de 10.2 l/s. Como ya se ha comentado, en ambos casos se llega a saturar el terreno, por lo que habrá acumulación

de agua durante un periodo de tiempo hasta que el suelo es capaz de drenar toda el agua. En el caso de que esta agua acumulada alcanzase una altura superior a la de la berma (25mm), el agua desbordaría por el tejado.

7.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el fin de conocer la influencia de los diferentes parámetros con los que SWMM5 define las cubiertas verdes, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros que definen un tejado verde y que potencialmente pueden afectar en mayor medida a la capacidad de retención y detención del tejado.

En primer lugar, debemos diferenciar entre retención y detención. [30] La retención se refiere al volumen de agua de lluvia que el tejado es capaz de mantener en el sistema sin dejar que dicho volumen se convierta en escorrentía, el agua retenida puede abandonar el sustrato posteriormente como evapotranspiración. En cambio, la detención se refiere al retraso temporal entre el agua que no es retenida y la salida de esta agua como escorrentía.

La retención se ve más afectada por las propiedades físicas del sustrato, particularmente por la distribución de tamaño de poros y la máxima capacidad de retención del agua. Por otro lado, el efecto de la detención está mayormente afectado por la porosidad y la conductividad hidráulica, es decir, por las propiedades que definen la velocidad a la cual el agua puede atravesar el sustrato.

Una vez expuesto lo anterior, los parámetros que se estudiarán en este análisis de sensibilidad serán: la permeabilidad o conductividad hidráulica, la capacidad de retención del agua y la existencia o no de una berma.

Se ha considerado solamente el evento de lluvia asociado al periodo de retorno de 10 años por ser el más extremo y solo se ha evaluado un evento ya que no interesa evaluar la magnitud del evento sino la diferencia del comportamiento hidráulico de una cubierta vegetal según sus características. Tampoco se ha tenido en cuenta la evapotranspiración en el análisis de sensibilidad ya que como se ha observado en el primer análisis de los diferentes espesores, su efecto es prácticamente nulo para eventos de tan corta duración.

7.3.1. PERMEABILIDAD

Se debe tener en cuenta que la permeabilidad de sustratos para cultivos tiene, por norma general, valores muy elevados en comparación con los terrenos naturales, ya que están compuestos por materiales muy porosos. Por lo que valores elevados como 200 mm/h no deben sorprendernos.

Como se ha dicho, los valores recomendados por el manual de SWMM5 oscilan entre 120-0.25 mm/h; la normativa FLL alemana para tejados verdes recomienda que este valor sea superior a 0.36 mm/h y el rango de valores que propone van desde 22.9 – 180 mm/h dependiendo de qué materiales esté compuesto el sustrato; el manual del CIRIA propone un rango de valores mucho más elevado, de 21.6 – 4200 mm/h.

Para realizar este estudio de sensibilidad de la permeabilidad en el comportamiento hidráulico de un tejado verde se ha seleccionado un espesor de sustrato de 150mm y se han analizado tres valores de permeabilidad: 50, 100 y 180 mm/h, tomando el valor

máximo a analizar el propuesto por la normativa alemana. En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos.

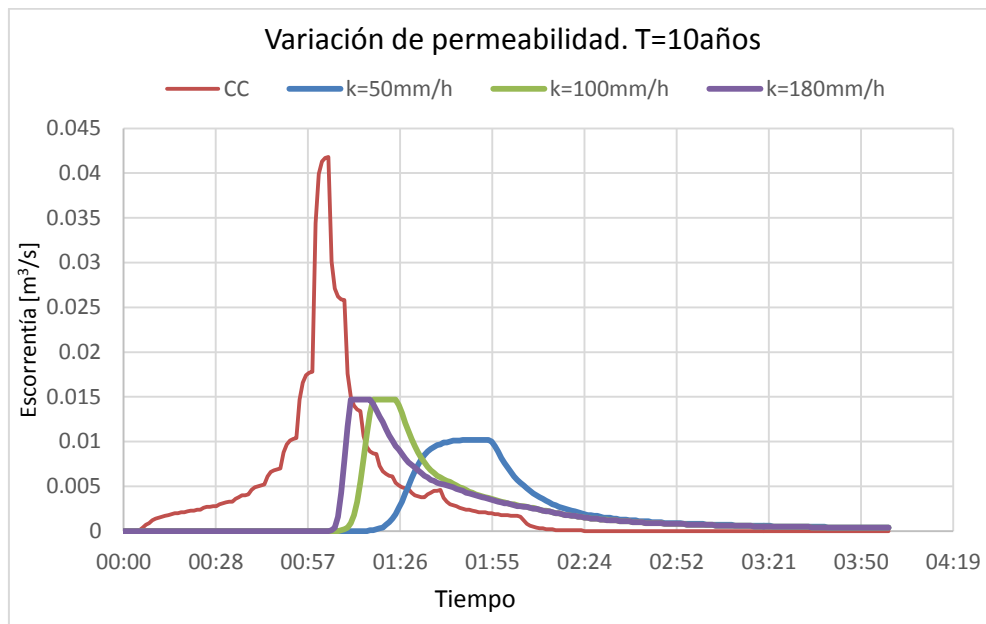


Figura 33: Análisis de sensibilidad de la permeabilidad. Lluvia asociada a T=10años

Cubierta	P _T [mm]	t _{pico} [h]	E _T [mm]	E _p [m³/s]	E _{coef}
CV1-50mm/h	72.19	01:46	37.97	0.0102	0.526
CV2-100mm/h	72.19	01:18	40.47	0.0147	0.561
CV3-180mm/h	72.19	01:11	42.4	0.0147	0.587
C. Convencional	72.19	01:04	72.19	0.0418	1.000

Tabla 21: Características de la escorrentía para diferentes valores de permeabilidad. T=10años

Como se observa en la figura con claridad, el parámetro de la permeabilidad tiene una influencia importante en el comportamiento hidráulico de un tejado verde. El efecto en el volumen de agua retenida no es de gran importancia, pero como ya se esperaba, las mayores variaciones tienen que ver con el caudal pico de escorrentía y el tiempo que tarda en alcanzarse. En los tres casos el volumen de agua retenida es de aproximadamente el 50%. Para mayores permeabilidades la retención es ligeramente mayor, exactamente un 6.1%.

En cuanto a lo que se refiere a la detención, la variación de permeabilidad influye notablemente en los resultados. Se observa que cuanto mayor es la permeabilidad el tiempo que se tarda en alcanzar el caudal pico de escorrentía es menor, este resultado era esperable, ya que, a mayor permeabilidad, el agua es capaz de atravesar el sustrato a mayor velocidad. También se observa que el tiempo que el sustrato está drenando el caudal pico es menor, quiere decir que prácticamente se está drenando el agua precipitada instantáneamente, por lo que el sustrato está menor tiempo saturado.

En beneficio del funcionamiento de la red de drenaje y la disminución del riesgo de inundación, interesa retrasar lo máximo posible la transformación de agua de lluvia en escorrentía, pero, por otro lado, no interesa que la cantidad de agua en el tejado verde sea

superior a la capacidad máxima de retención, ya que eso significaría que el tejado está anegado, afectando negativamente a las plantas cultivadas.

7.3.2. MODIFICAR CAPACIDAD DE RETENCIÓN

La capacidad de retención de un suelo es el contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo después de llegar a saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente. En SWMM5 este parámetro no tiene unidades, sino que es la relación entre el volumen total y el volumen máximo de agua que el suelo puede retener. Por debajo de este valor el drenaje vertical del agua a través del sustrato será nulo.

El rango de valores posibles es muy amplio, un valor mínimo correspondiente a suelos arenosos sería de 0.062, en cambio, para suelos arcillosos capaces de retener bastante agua, este valor podría alcanzar 0.378.

El rango de valores propuesto para las cubiertas vegetales por el manual CIRIA van desde 0.25 – 0.65, en cambio la normativa FLL alemana para tejados verdes recomienda valores que oscilan entre 0.21 – 0.33. Estos valores dependerán en gran medida de la porosidad del sustrato y pueden variar desde 0.1 como valor aproximado para arenas hasta 0.4 como valor aproximado para arcillas.

Se analizarán tres valores diferentes de capacidad de retención: 0.2, 0.3 y 0.39. Se debe tener en cuenta que el valor de la máxima capacidad de retención de agua del sustrato debe ser inferior a la porosidad, que en este caso se ha tomado como 0.4. El resto de parámetros se mantendrán iguales en los tres tejados, siendo el grosor del sustrato de 150 mm y el evento de lluvia será el correspondiente a un periodo de retorno de 10 años.

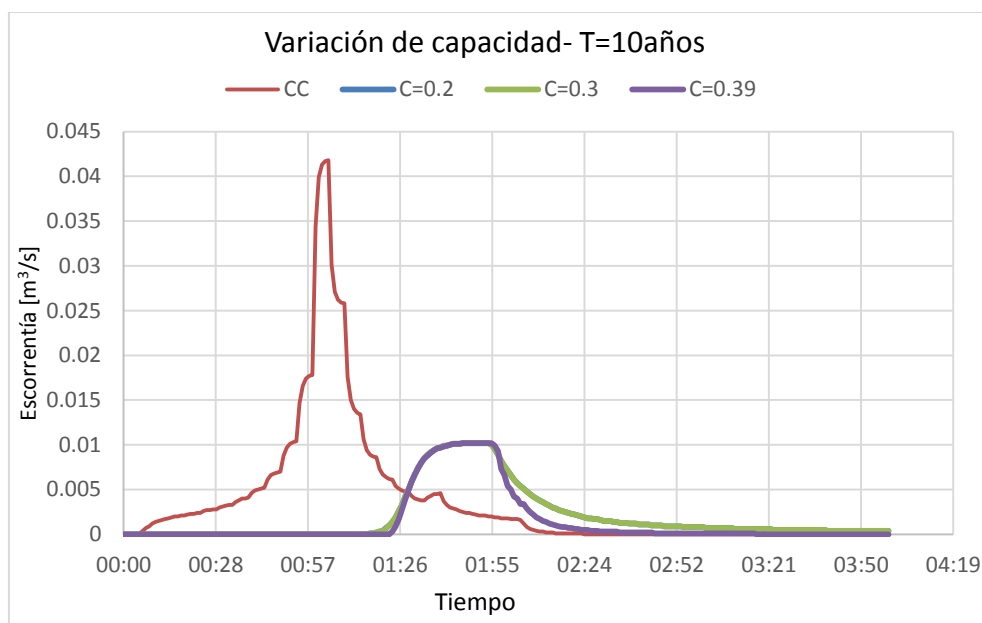


Figura 34: Análisis de sensibilidad de la capacidad. Lluvia asociada a T=10años

Cubierta	P_T [mm]	t_{pico} [h]	E_T [mm]	E_P [m ³ /s]	E_{coef}
CV1-0.2	72.19	37.97	01:43	0.0101	0.526
CV2-0.3	72.19	37.97	01:43	0.0101	0.526
CV3-0.39	72.19	28.57	01:43	0.0101	0.396
C. Convencional	72.19	72.19	01:04	0.0418	1.000

Tabla 22: Características de la escorrentía para diferentes valores de capacidad. T=10años

Para los valores de capacidad de retención de agua igual a 0.2 y 0.3 los resultados de escorrentía no varían, de hecho, se puede observar en el gráfico que los resultados se superponen.

Como era de esperar, el caudal pico de escorrentía y el tiempo que se tarda en alcanzar no varían en ninguno de los casos. En cambio, el volumen total de escorrentía si varía en el caso de mayor capacidad de retención, este resultado también se corresponde con los resultados esperados, ya que, a mayor capacidad de retención, menor volumen de agua drenará.

Aunque la capacidad de retención de agua de un sustrato supone ligeras diferencias según su valor en el volumen de agua que es retenida, estas diferencias no son de gran importancia, por lo que se podría decir que este parámetro tiene menor influencia en las características hidráulicas de un tejado verde que la permeabilidad.

7.3.3. SIN BERMA

En este caso se han simulado los diferentes paquetes de tejado con las mismas propiedades, pero diferente grosor y considerando que no hay berma, por lo que la cubierta verterá agua directamente a la calle. Se ha simulado para el evento de lluvia asociado a un periodo de retorno de 10 años. La función de la berma es proteger el sustrato frente al viento y evitar desprendimientos del mismo hacia la calle, y en cuanto al funcionamiento hidráulico, retiene el agua caída sobre la cubierta y que el sustrato no es capaz de filtrar a la misma velocidad que la intensidad de lluvia por lo que se acumula sobre el sustrato.

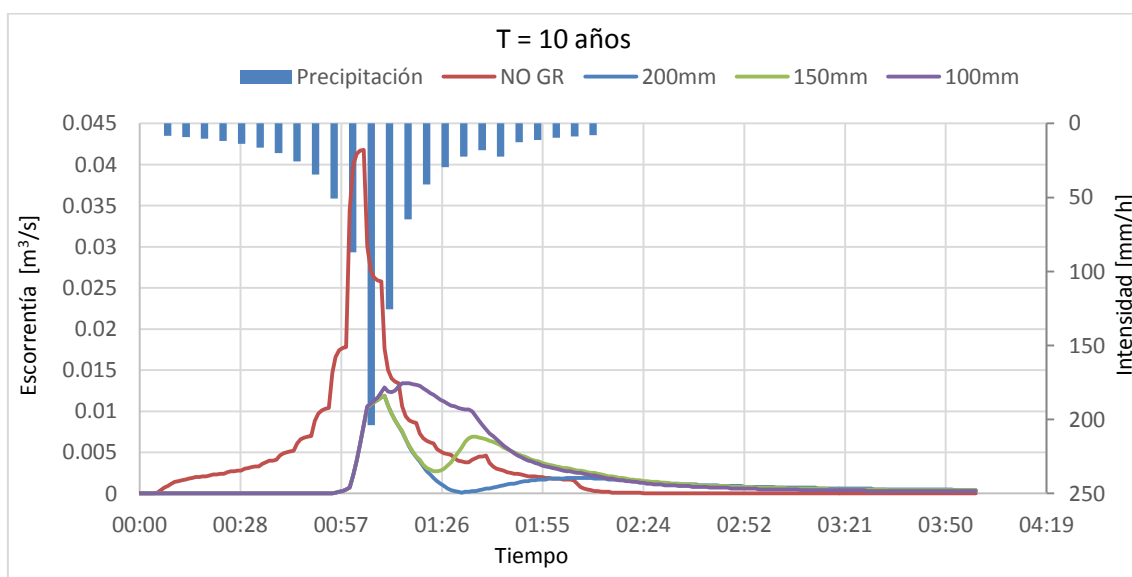


Figura 35: Análisis de sensibilidad sin berma. Lluvia asociada a T=10años

Para entender mejor el comportamiento de las cubiertas se ha creído conveniente mostrar en el mismo gráfico la precipitación. También se muestran en la siguiente tabla otros valores que no han aparecido hasta ahora, como son la escorrentía superficial (E_{sup}) de las cubiertas y que cae directamente a las calles y la escorrentía drenada ($E_{drenada}$), que es el agua de lluvia que las cubiertas vegetales pueden absorber y drenar hacia la red de colectores.

Cubierta	P_T [mm]	t_{pico} [h]	E_{sup} [mm]	$E_{drenada}$ [mm]	E_T [mm]	E_p [m ³ /s]	E_{coef}	ET [mm]
CV-200mm	72.19	01:10	14.27	11.63	25.90	0.012	0.359	0.12
CV2-150mm	72.19	01:10	14.27	23.75	38.02	0.012	0.527	0.12
CV3-100mm	72.19	01:15	14.27	35.29	50.10	0.013	0.694	0.12
C. Convencional	72.19	01:04	72.9	0	72.09	0.042	0.999	0.10

Tabla 23: Características de la escorrentía sin berma. T=10años

Se observa como el tiempo que se tarda en alcanzar el caudal pico de escorrentía en las cubiertas vegetales es muy parecido al de la cubierta convencional, por lo que la ausencia de una berma está haciendo que el sustrato no pueda absorber una gran parte del agua precipitada, sobre todo cuando ocurren las intensidades de lluvia mayores, por lo que el agua está fluyendo por la superficie del sustrato y vertiendo directamente a la calle.

Se observa que cuando las intensidades de lluvia disminuyen la escorrentía también y tras un periodo de tiempo vuelve a ocurrir otro pico de escorrentía, pero en este caso se trata del agua drenada por el sustrato y no de la escorrentía superficial de la cubierta.

Es cierto que en valores de reducción de volumen total de escorrentía, los tejados verdes siguen teniendo un rendimiento aceptable, con coeficientes de escorrentía que varían desde 35.9% hasta el 69.4% según el espesor del sustrato. Pero en cuanto a la capacidad de retención de agua, al no disponer de una berma que permita recoger el agua de lluvia durante los instantes de mayor intensidad en los que el sustrato no es capaz de infiltrar toda el agua de lluvia, el tejado verde pierde esta capacidad.

Se puede concluir que la función que tiene una berma en una cubierta no es solo necesaria para proteger las cubiertas verdes frente al viento, sino también mejoran sensiblemente el rendimiento hidráulico.

7.4.CONCLUSIONES

A partir del análisis de sensibilidad de los parámetros más influyentes en el comportamiento de un tejado verde en cuanto a volumen de escorrentía y caudales pico, excepto por el espesor, que se ha analizado a parte con mayor detalle, se pueden extraer algunas conclusiones.

En cuanto a la capacidad de retención de agua de un sustrato, el funcionamiento hidráulico varía en relación al volumen total de escorrentía, pero estas diferencias no serán de gran magnitud, siendo la diferencia de volumen total de escorrentía entre los sustratos con una capacidad de retención del agua del 0.2 y 0.39 del 10% aproximadamente, por lo que puede concluirse que este parámetro no tiene una gran influencia.

Por otro lado, el valor de la permeabilidad influye notablemente en el tiempo que se tarda en alcanzar el caudal pico de escorrentía, adelantándolo con mayores permeabilidades y atrasándolo con valores menores de permeabilidad. Uno de los beneficios que suponen los tejados verdes es la laminación de caudales pico y por tanto el retraso de la avenida, por lo que es deseable retrasar los caudales pico y reducir su magnitud. Por esta razón se deberá llegar a un equilibrio para que la permeabilidad de un sustrato permita retrasar el caudal pico pero también sea capaz de drenar a una velocidad suficiente de tal manera que se evite el anegamiento de la cubierta y los efectos negativos que esto supondría sobre las plantas.

En cuanto a la altura de berma, esta altura no tiene por qué ser muy alta, simplemente debe tener una altura suficiente para retener el agua durante las mayores intensidades de las precipitaciones evitando que se produzca escorrentía superficial en las cubiertas vegetales. Por esto, existencia de una berma es necesaria, ya no solo para mejorar los beneficios hidráulicos de las cubiertas vegetales, sino también como elemento de protección frente al viento de las mismas.

8. MODELIZACIÓN CONTINUA

Uno de los propósitos de este trabajo es estudiar el comportamiento hidráulico de un tejado verde sometido a las características climatológicas de Barcelona. Por esta razón, un análisis de eventos de lluvia aislados no es suficiente, ya que no permite simular las características típicas, clima mediterráneo, el comportamiento de las cubiertas vegetales ante eventos torrenciales que se producen tras largos periodos secos así como el efecto de la evapotranspiración. En este apartado se explicará la metodología utilizada, los datos introducidos y los resultados obtenidos.

La importancia de estudiar el comportamiento de una cubierta verde a lo largo de un año reside en conocer la influencia de efectos que afectan al balance hídrico a largo plazo, como lo es la evapotranspiración. Además de conocer la influencia de periodos secos, lluvias continuas y eventos torrenciales, será de interés observar la cantidad de agua que es capaz de retener el sustrato a lo largo del tiempo de tal manera que se pueda evaluar la necesidad o no de riego.

De igual forma que en el estudio de eventos aislados se han estudiado tres paquetes de tejado verde diferentes entre ellos según su espesor, estos espesores son: 100, 150 y 200 mm, así como una cubierta convencional para poder comparar los resultados obtenidos.

8.1. PLUVIOMETRÍA

Los datos de pluviometría para esta simulación son clave, ya que la calidad de los inputs permitirá tener unos resultados precisos. En los estudios de hidrología urbana el intervalo de tiempo en que debemos disponer de información de lluvia es mucho más pequeño que el que se utiliza habitualmente en los estudios hidrológicos de cauces naturales. Los intervalos de tiempo de media hora o una hora, habituales en el estudio hidrológico de una cuenca fluvial no son admisibles en general en zona urbana. Deberemos operar con pasos de tiempo de 5 a 10 minutos, como norma general, o incluso menores según el tamaño de la cuenca. Esto supone una información muy detallada de la evolución de la lluvia en el tiempo [3]. Por esta razón de la diferencia de escala con la hidrología tradicional, no es fácil obtener una pluviometría anual con datos tomados cada cinco minutos, ya que las estaciones meteorológicas no suelen recoger datos para estos intervalos de tiempo tan pequeños.

Sin embargo, para este estudio se han obtenido los datos de lluvia anuales con precisión temporal de cinco minutos de dos puntos diferentes:

- Pluviometría del año 2010 medida en el observatorio meteorológico de Fabra, Barcelona. Altitud 408m - Latitud: 41° 25' 6" N - Longitud: 2° 7' 27" E.
- Pluviometría del año 1988 medida en la estación meteorológica de Granollers. Altitud: 145 m - Latitud: 41° 36' 28" N - Longitud: 2° 17' 10" E.

En el caso de la precipitación total en la estación de Barcelona, la precipitación acumulada a lo largo del año es de 539.8 mm, por lo que se puede afirmar que representa un año estándar, ya que la precipitación media anual en Barcelona se estima en unos 500 mm [32] anuales. Para el caso de Granollers, la precipitación anual es parecida y en el caso de los datos disponibles, la precipitación total es de 523.75 mm.

También interesa conocer los eventos extremos o más importantes de lluvia puntuales para poder analizarlos individualmente, ya que como se ha mencionado en los apartados anteriores, una de las características del clima mediterráneo litoral es que un alto porcentaje de la lluvia total precipitada en un año suele corresponder a unos pocos eventos de lluvia. Para poder reconocer cuando se producen los eventos de lluvia más significativos se ha representado la precipitación acumulada a lo largo del año de tal manera que se puedan reconocer de forma visual estos eventos.

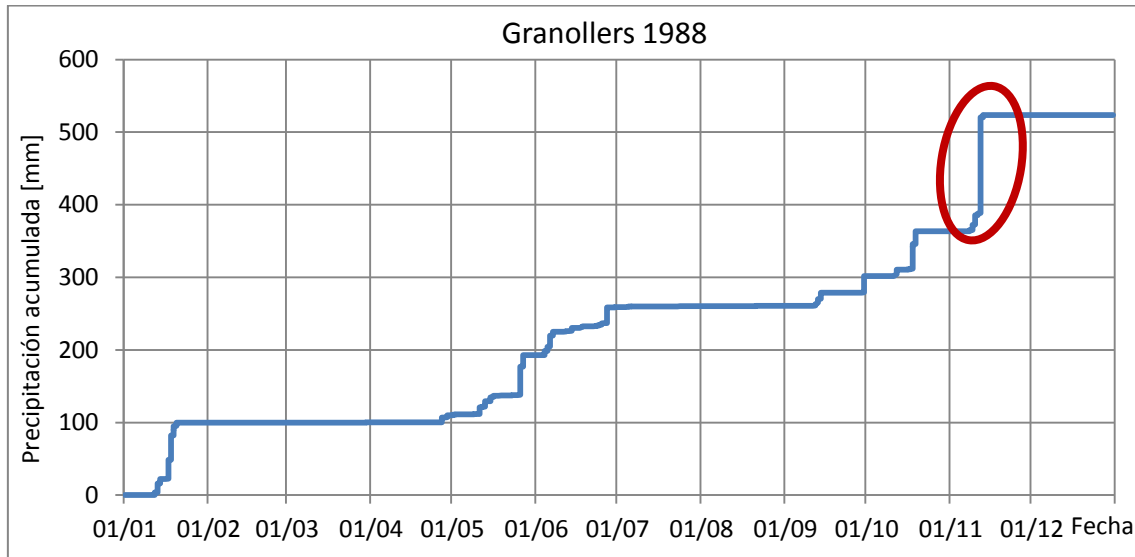


Figura 36: Precipitación acumulada. Granollers 1988

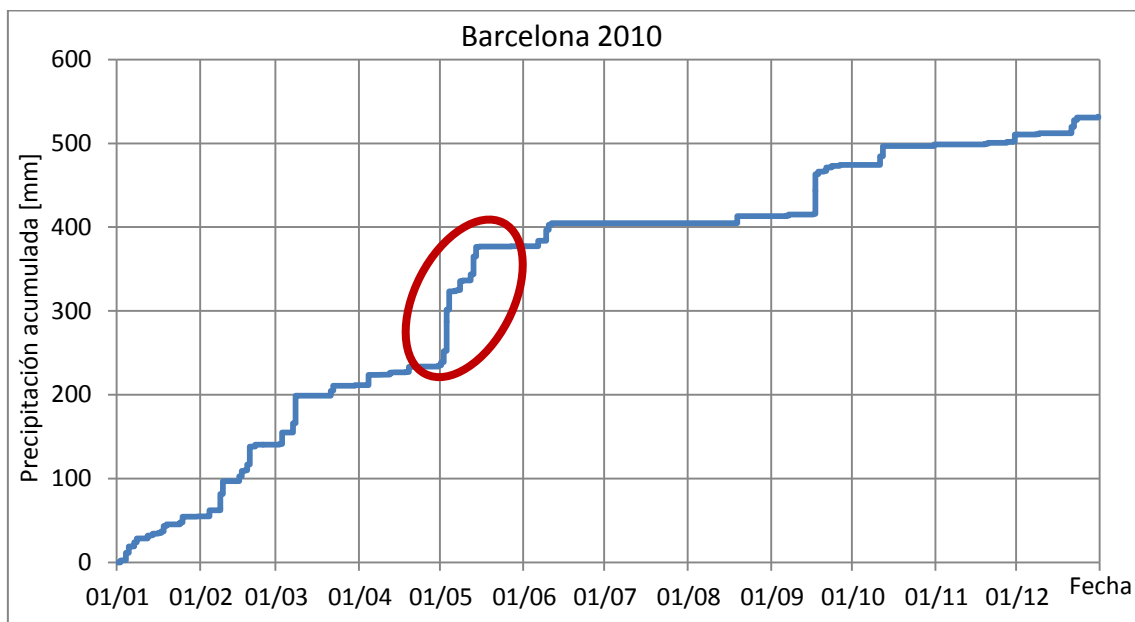


Figura 37: Precipitación acumulada. Barcelona 2010

En ambos gráficos de lluvia acumulada, tanto en Granollers como en Barcelona, los eventos de lluvia están poco repartidos a lo largo del año, prácticamente toda la lluvia anual precipita en cinco o seis eventos importantes. En ambas gráficas se ha remarcado con un círculo rojo los eventos más importantes en cada caso. En el apartado de resultados

se comentará con más detalle el comportamiento de las cubiertas verdes respecto a una cubierta convencional en cada uno de estos eventos.

8.1.1. LLUVIA EFECTIVA Y COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

La lluvia efectiva o útil es la fracción de lluvia que realmente está disponible para satisfacer al menos parte de las necesidades hídricas de las plantas, es decir, es la precipitación menos las pérdidas que se produzcan en el camino desde que el agua precipita hasta que queda en el terreno y puede ser utilizada por las plantas. No toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede realmente ser utilizada por las plantas, parte del agua de lluvia se infiltra a través de la superficie y parte fluye sobre el suelo en forma de escorrentía superficial debido a la diferencia entre la velocidad de caída de las gotas y la velocidad de infiltración. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo. Del total de agua que se infiltra, parte percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenado en dicha zona y podría ser utilizada por las plantas.

Por tanto, haciendo un repaso de las pérdidas que pueden influir en la diferencia de volumen entre la lluvia total y la efectiva son: interceptación por las plantas y otros obstáculos y almacenamiento en la superficie (pequeñas depresiones o charcos), escorrentía superficial, evapotranspiración y percolación. Para el caso de las cubiertas vegetales, al tratarse de espesores pequeños se puede considerar que no existen pérdidas por percolación. En cuanto a las pérdidas por interceptación, al tratarse de cultivos de pequeñas alturas tampoco se consideran estas pérdidas, además se considera una superficie que no permite zonas de encharcamiento o pequeñas depresiones, por lo que las pérdidas por almacenamiento en superficie se considerarán nulas. En resumen, las únicas pérdidas que se consideran a la hora de evaluar las cubiertas vegetales son la escorrentía drenada por el sustrato y la evapotranspiración, ambos parámetros son evaluados por el propio programa SWMM5.

El coeficiente de escorrentía se define, esencialmente, como la relación entre el volumen de lluvia efectiva (o de escorrentía) y el de la lluvia total, y, por tanto, varía en el rango de valores entre 0 y 1. Es decir, es la relación entre la lluvia total que precipita en un área y la cantidad de agua que se convierte directamente en escorrentía. En zonas urbanas con grados de impermeabilidad de la superficie muy elevados, los coeficientes de escorrentía tienden a 1.

Principalmente, el fenómeno físico que intenta reproducir el coeficiente de escorrentía es el proceso de pérdidas que actúa en diferentes vías como ya se ha mencionado (interceptación, almacenamiento en depresiones, infiltración, evapotranspiración, etc.), y que depende de las características del uso y tipo de suelo, de la topografía y de la propia tormenta. El proceso de pérdidas también está afectado por la magnitud de la intensidad de lluvia. Cuanto mayor sea ésta, menor es la importancia de las pérdidas, lo que se traduce en una tendencia de aumento del coeficiente de escorrentía. La topografía también incide en valor del coeficiente de escorrentía, ya que, a mayores pendientes, las pérdidas como la infiltración y retención superficial serán de menor importancia. En nuestro caso esta diferencia del coeficiente de escorrentía debido a la pendiente de las cubiertas vegetales no se ha evaluado.

8.2.EVAPOTRANSPIRACIÓN

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo [33].

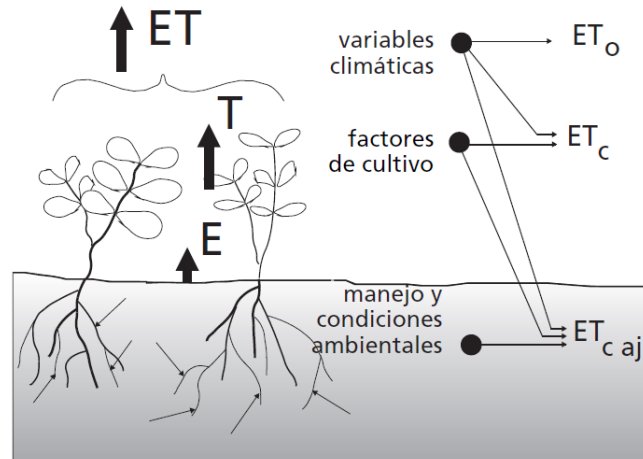


Figura 38: Factores que afectan la ET [33]

El clima, las características de cultivo, el manejo y el medio ambiente son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los principales factores climáticos que afectan a la ET son la radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento. Los factores referentes al tipo de cultivo que afectan a la ET son la altura del cultivo, la rugosidad, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares. Otros factores que también afectan son la salinidad o baja fertilidad del suelo y el uso de fertilizantes.

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración potencial (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar o evapotranspiración real (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente cuidado y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. $ET_{c\ aj}$ requiere generalmente una corrección, cuando no existe un cuidado óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

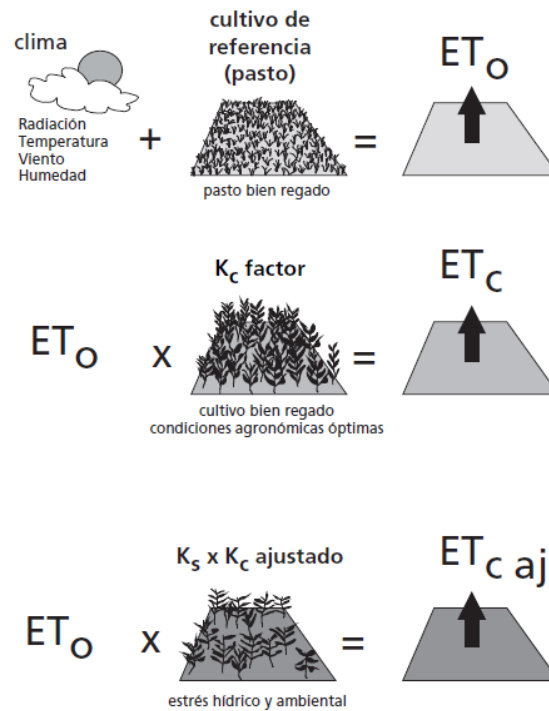


Figura 39: ET₀, ET_c y ET_{c aj}

Para este caso de estudio se han obtenido los valores de evapotranspiración potencial a partir de los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas [34]. Estos valores han sido calculados mediante la fórmula de Thornwaite basada en la temperatura media.

$$ETP = ETP_{sin\ corr} \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$ETP_{sin\ corr} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad \text{Ecuación 19}$$

$$I = \sum i \quad \text{Ecuación 20}$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde t es la temperatura media mensual, i índice de calor mensual, I índice de calor anual, $ET0_{sin\ corr}$ es la evapotranspiración potencial para meses de 30 días y 12 horas de sol, N número máximo de horas de sol y d número de días al mes.

Granollers												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
T [°C]	6.8	7.7	10.8	12.6	16.4	19.9	22.8	22.4	20.6	15.6	10.8	7.8
ET0 [mm]	14.8	17.3	37.6	50.2	79.1	110.2	137.6	124.9	96.7	57.3	29.5	16.7
P [mm]	25.2	27.8	59.8	41.3	52.2	51.8	38.8	44.3	79.6	85.7	32.8	46.2
P-ET0 [mm]	10.4	10.5	22.2	-8.9	-26.9	-58.4	-98.8	-80.6	-17.1	28.4	3.3	29.5

Tabla 24: ET0 Granollers

Barcelona												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
T [°C]	9.4	9.9	12.3	14.6	17.7	21.6	24.4	24.2	21.7	17.5	13.5	10.2
ET₀ [mm]	19.9	22.3	37.1	53.4	86.5	121.2	149	139.2	99.8	63.2	34.5	21.5
P [mm]	33.3	42.1	46.2	46.9	51.8	42.8	29.2	48.4	77.4	80.2	48.8	47.1
P-ET₀ [mm]	13.4	19.8	9.1	-6.5	-34.7	-78.4	-119.8	-90.8	-22.4	17	14.3	25.6

Tabla 25: ET₀ Barcelona

Los datos presentados corresponden a la evapotranspiración potencial, sin tener en cuenta el tipo de cultivo. Como se ha adelantado existe la ET de cultivo bajo condiciones estándar y la ET bajo condiciones no estándar. Para el presente estudio se utilizará la ET real o de cultivo estándar, tomando como hipótesis que el cultivo se encuentra bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo. Los efectos de las características que distinguen al cultivo están incorporados en el coeficiente de cultivo (K_c). Por lo que en la metodología del coeficiente de cultivo, la evapotranspiración del cultivo, en este caso, de la cubierta vegetal, se calcula multiplicando ET_0 por K_c .

Existen tablas con valores específicos para los coeficientes de cultivo según el tipo y las condiciones a las que esté sometidas, como por ejemplo las tablas propuestas por la FAO. En este caso, los coeficientes de cultivo que se han tomado son los que propone la *University of California: Division of Agricultural and Natural Resources* [35] para cultivos de tipo césped. Los rangos de K_c que se muestran dependen de la estación del año y de las condiciones hídricas a las que esté sometido el cultivo. Se ha considerado que estos valores son aplicables en este caso de estudio ya que el clima de California podría decirse que es un clima mediterráneo, caracterizado por veranos largos, cálidos y secos y los cultivos de césped deben ser regados para poder sobrevivir en estas condiciones.

Condiciones hídricas del cultivo	K_c	
	Período frío	Período cálido
Óptimo	0.8	0.6
Déficit	0.6	0.4
Supervivencia	0.4	0.2

Tabla 26: Coeficientes de cultivo [35]

Para determinar qué coeficiente de cultivo utilizar en el caso de estudio se ha tomado la hipótesis que se describe a continuación. Se ha definido el nivel de comportamiento óptimo, déficit o de supervivencia según el valor de la diferencia entre precipitación mensual y evapotranspiración mensual (P-ET₀). Suponiendo un año normal, cuando esta diferencia sea positiva se determinará como rendimiento óptimo y cuando sea negativa déficit. En el caso de que se trate de un año seco, es decir, los años previos hayan tenido precipitaciones inferiores a la media, será diferencia negativa igual a rendimiento de déficit y diferencia negativa, rendimiento de supervivencia:

- $P-ET_0 > 0 \rightarrow$ óptimo o déficit.
- $P-ET_0 < 0 \rightarrow$ déficit o supervivencia.

Para diferenciar entre estación fría o cálida se considera la estación fría como los meses de invierno y otoño (septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero) y estación cálida los meses de verano y primavera (marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto).

Por tanto las evapotranspiraciones reales una vez multiplicadas por su correspondiente coeficiente de cultivo quedan de la siguiente manera:

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Año normal												
Granollers	11.84	13.84	10.38	22.56	20.08	31.64	44.08	55.04	58.02	45.84	23.6	13.36
Barcelona	15.92	17.84	22.26	21.36	34.6	48.48	59.6	55.68	59.88	50.56	27.6	17.2
Año seco												
Granollers	8.88	10.38	15.04	10.04	15.82	22.04	27.52	24.98	38.68	34.38	17.7	10.02
Barcelona	11.94	13.38	14.84	10.68	17.3	24.24	29.8	27.84	39.92	37.92	20.7	12.9

Tabla 27: Evapotranspiración real

Para el caso de la cubierta convencional existen las pérdidas por evaporación, pero éstas no dependen del coeficiente de cultivo y no afectan al balance hídrico a largo plazo, sino solamente cuando hay agua en la cubierta, es decir, cuando se produce la tormenta, ya que las cubiertas convencionales no tienen capacidad de almacenamiento de agua y por tanto las pérdidas por evaporación serán mucho menores que para las cubiertas vegetales.

SWMM5 no permite aplicar valores de evaporación diferentes según el área, por lo que para evitar que la evaporación de la cubierta convencional se vea afectada por el coeficiente de cultivo, se ha realizado un cálculo independiente de las cubiertas convencionales introduciendo directamente la lluvia efectiva y considerando que la evaporación es nula. Cuando nos referimos a la lluvia efectiva quiere decir que las pérdidas por evaporación ya han sido sustraídas a la lluvia real. Se han tenido en cuenta las pérdidas por evaporación solamente cuando existe lluvia.

8.3.ESCENARIO 1

El primer escenario de estudio que se propone es la simulación de un año normal, es decir, el comportamiento hídrico de las plantas se considera óptimo o déficit y por tanto no se parte de unas condiciones previas secas. Este caso será el más óptimo para las plantas, ya que las condiciones a las que están sometidas no llegan al límite. También se espera comprobar que es el año más óptimo para la función hidrológica de las cubiertas vegetales, ya que se producirá mayor evapotranspiración favoreciendo la reducción de escorrentía total.

En primer lugar, se mostrarán y comentarán los resultados correspondientes a Barcelona y después los correspondientes a Granollers. En ambos casos se ha evaluado el comportamiento global a lo largo del año y se han analizado individualmente los eventos de lluvia importantes que se han producido a lo largo del año estudiado.

También se ha analizado para el caso de Barcelona la necesidad hídrica de las plantas, haciendo un seguimiento del volumen de agua retenido en el sustrato a lo largo del año en función de la lluvia precipitada, la evapotranspiración, la escorrentía y las características del sustrato. Se considerará que las plantas en déficit hídrico cuando el volumen de agua almacenado en el sustrato sea inferior al punto de marchitez.

8.3.1. BARCELONA

En el caso de la simulación hecha con los valores de precipitación y evapotranspiración correspondientes a Barcelona se han obtenido los resultados computados anualmente que se muestran en la siguiente tabla resumen:

	P [mm]	ET [mm]	R _T [mm]	P _R [l/s]	R _{Coef}
CV1-200	538.90	248.56	276.50	0.9	0.513
CV2-150	538.90	231.27	293.79	1.9	0.545
CV3-100	538.90	206.40	319.57	4	0.593
CC	538.9	22.65	516.25	14.5	0.957

Tabla 28: Escenario 1 – Barcelona

Donde P es la precipitación total anual, ET la evapotranspiración, R volumen total de escorrentía, R_p el pico de escorrentía y R_{Coef} el coeficiente de escorrentía. CC hace referencia a la cubierta convencional, $CV1-200$ cubierta verde con espesor de sustrato de 200 mm, $CV2-150$ cubierta verde con espesor de sustrato de 150 mm y $CV3-100$ cubierta verde con espesor de sustrato de 100 mm.

El caudal máximo que se ha producido en el año de estudio también es notablemente inferior, reduciéndose de 14.5 l/s en el caso de una cubierta convencional a 1.9, 1.9 y 4 l/s dependiendo del espesor del sustrato del paquete de tejado verde. El coeficiente de escorrentía para los tres casos es similar, en torno al 0.5, esto quiere decir que se está reduciendo a la mitad el agua de escorrentía.

Otro aspecto importante que se debe analizar es la cantidad de agua retenida en el sustrato a lo largo del tiempo para poder decidir si será necesario el uso de sistemas de riego o no. Los límites máximo y mínimo de agua en el sustrato están marcado por la máxima capacidad de retención del agua, que en este caso se ha tomado a partir de un valor de 0.27 que expresa fracción volumétrica y la mínima cantidad de agua que debe tener el sustrato para poder asegurar la supervivencia de la vegetación está marcada por el punto de marchitez, que en este caso es de 0.1. Para calcular el agua retenida se ha hecho un balance entre entradas de agua (lluvia) y pérdidas (escorrentía, evapotranspiración). Se ha partido de un sustrato completamente seco.

Se observa en la imagen que se muestra debajo como en los meses más cálidos donde no se producen precipitaciones, la tendencia del sustrato es a secarse llegando a estar durante aproximadamente dos meses por debajo de las necesidades hídricas de las plantas, por esta razón parece obvia la necesidad de instalar un sistema de regadío en las cubiertas vegetales en el área de Barcelona.

Se muestran solamente los resultados obtenidos para la cubierta de mayor espesor (200 mm) porque los resultados obtenidos para los otros dos espesores son muy similares pero con límites de máxima retención y punto de marchitez ligeramente diferentes. En el *Anejo 3: Simulación continua* se muestran los gráficos obtenidos para los tres paquetes de tejado.

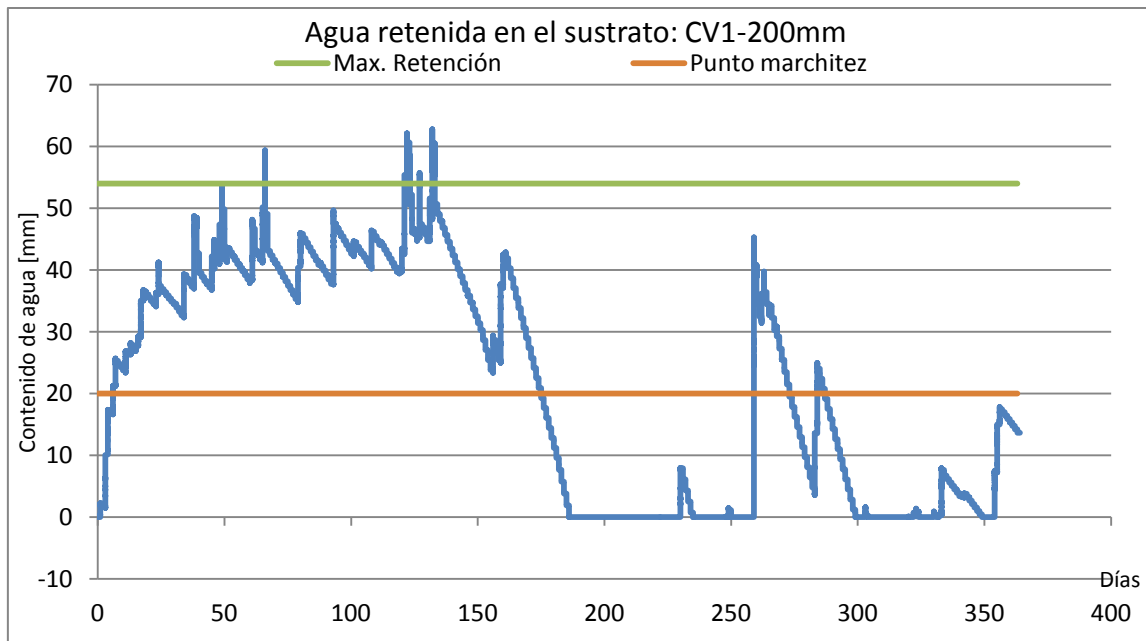


Figura 40: Agua retenida CV1-200mm - Barcelona 1

Para el caso de las cubiertas de 150 y 100 mm los resultados son similares, aunque con valores de máxima retención (40.5 y 27mm) y punto de marchitez (15 y 10mm) diferentes. Pero en los tres casos en los meses cálidos la situación es similar.

A continuación, se han analizado los eventos puntuales de lluvias a lo largo del año. Se han seleccionado los eventos que como mínimo han provocado escorrentía en alguna de las cubiertas verdes. Por tanto se ha podido observar que las precipitaciones de hasta 22 mm son absorbidas completamente por las tres cubiertas verdes, es decir, la reducción de escorrentía es del cien por cien.

Evento 1

Este evento de lluvia se produce entre el 08/02/2010 a las 11:50 hasta el 09/02/2010 a las 16:35 y la precipitación total acumulada es de 34.9 mm. Gráficamente se observa una clara reducción de los caudales pico de escorrentía en las tres cubiertas cuando se producen las mayores intensidades de lluvia. En cuanto a los volúmenes de escorrentía, se observa una disminución debido a la retención del sustrato y el efecto de la evapotranspiración. En el gráfico se muestra el periodo en el que se produce la tormenta y una hora después para ver cómo evolucionan los caudales de escorrentía, se ve como en las cubiertas vegetales sigue habiendo un pequeño caudal de escorrentía.

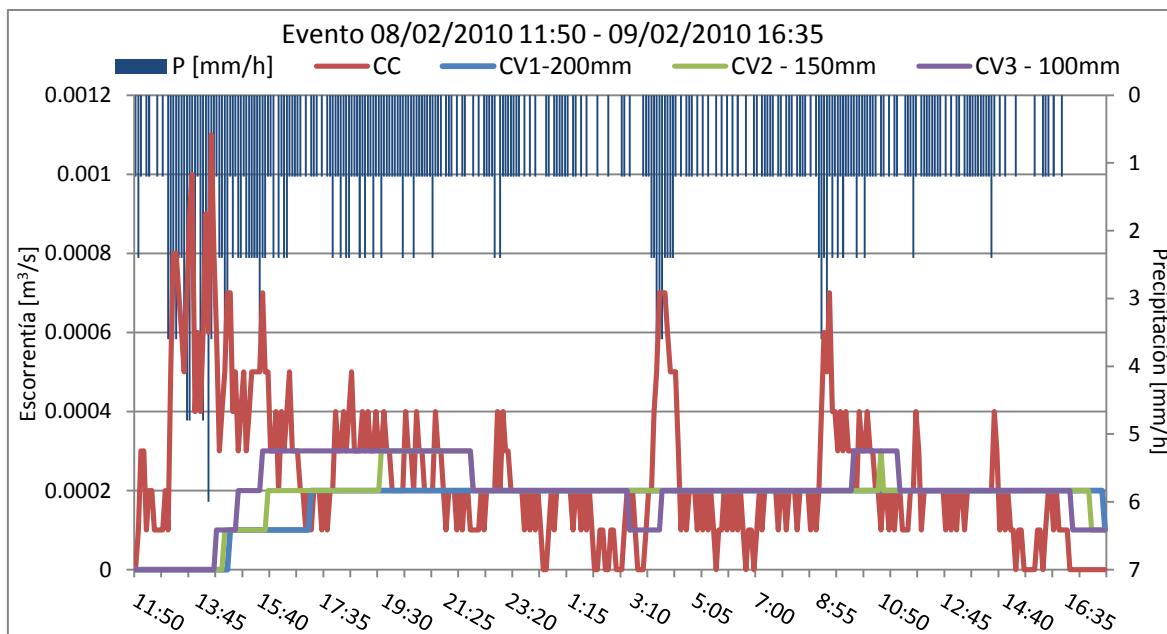


Figura 41: Escenario 1 - Barcelona - Evento 1

	R [mm]	R _{coef}	R _p [l/s]
CV1-200	25.163	0.721	0.3
CV2-150	27.114	0.777	0.3
CV3-100	29.350	0.841	0.2
CC	34.350	0.984	1.1

Tabla 29: Escenario 1 - Barcelona - Evento 1

En este caso los caudales máximos de escorrentía no son muy elevados, ya que no se producen intensidades de gran importancia. Como era de esperar, el sustrato de mayor grosor es capaz de reducir un mayor volumen de escorrentía.

Evento 2

Este evento de lluvia inicia el 07/03/2010 a las 16:20 y finaliza el 08/03/2010 a las 18:35 con una precipitación total de 43.8 mm. En este caso, la cantidad de lluvia precipitada consigue que las tres cubiertas vegetales produzcan escorrentía pero en cantidades diferentes. Además, para este evento se debe considerar ya que se alcanzan intensidades de lluvia importantes, llegando a tomar valores entorno a los 9 mm/h.

En este gráfico se observa como al final del evento la intensidad de lluvia es mayor y por tanto se producen los picos de escorrentía. Además de una reducción de volumen total de escorrentía se observa una clara disminución del caudal pico y un retraso en el tiempo del pico. Esto es notable, sobretudo, para los espesores mayores. También se remarca que a pesar de que la precipitación cese, la escorrentía en las cubiertas vegetales sigue, debido al efecto de laminación de caudal.

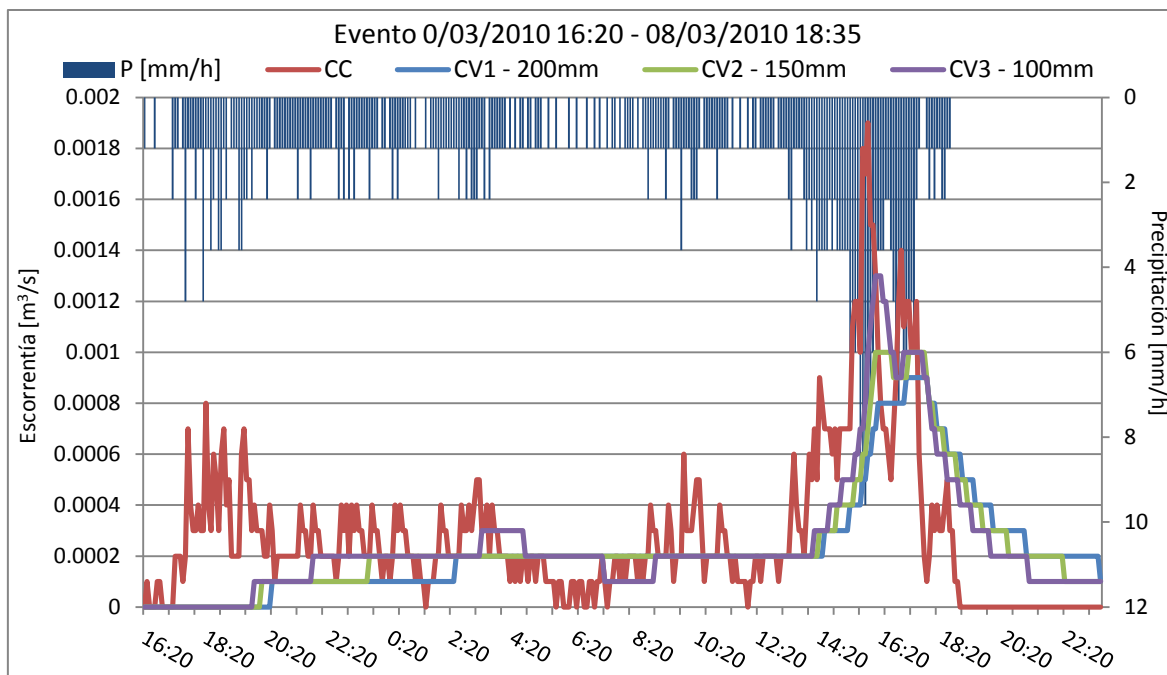


Figura 42: Escenario 1 - Barcelona - Evento 2

	R [mm]	R _{coef}	R _p [l/s]
CV1-200	34.715	0.793	0.9
CV2-150	36.748	0.839	1
CV3-100	37.886	0.865	1.3
CC	42.724	0.975	1.9

Tabla 30: Escenario 1 - Barcelona - Evento 2

Evento 3

Este evento se caracteriza por tener una precipitación muy repartida en el tiempo con una intensidad más o menos constante pero mantenida a lo largo del tiempo que dura la tormenta. Se inicia el 02/05/2010 a las 22:10 hasta el 04/05/2010 a las 23:15 y la precipitación total acumulada es de 83.7 mm. Al final del evento se produce un pico de intensidad de lluvia que permite observar como las cubiertas vegetales permiten amortiguar los caudales de escorrentía.

También se puede observar como cuando las precipitaciones se mantienen en el tiempo y los sustratos de las cubiertas vegetales están saturados o están al límite de su capacidad de retención de agua, los valores de caudales de escorrentía son muy parecidos. Pero este caso es un claro ejemplo de la capacidad que tienen los tejados verdes de reducir el caudal pico en comparación con una cubierta convencional.

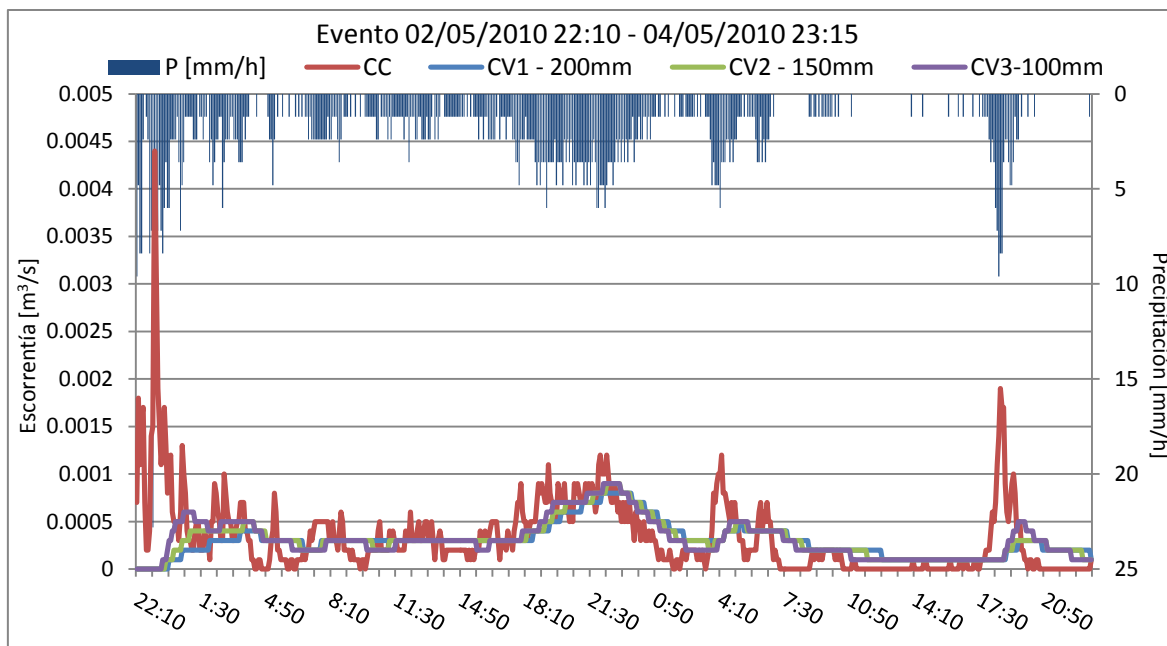


Figura 43: Escenario 1 - Barcelona - Evento 3

Se observa como el primer pico de mayor intensidad de lluvia es absorbido por las tres cubiertas vegetales y no es hasta prácticamente cuando el evento de lluvia lleva un día que las cubiertas empiezan a verter agua.

Es interesante analizar este evento ya que al ser de intensidad de lluvia continua a lo largo del tiempo cuando esta intensidad es mantenida un tiempo suficiente, las cubiertas vegetales tienen un comportamiento parecido a la cubierta convencional pero con gradientes de aumento de escorrentía menos marcados que la cubierta convencional.

	R [mm]	R _{coef}	R _p [l/s]
CV1-200	71.870	0.859	0.8
CV2-150	74.390	0.889	0.9
CV3-100	75.935	0.907	0.9
CC	82.935	0.985	4.4

Tabla 31: Escenario 1 - Barcelona - Evento 3

Eventos 4 y 5

En este apartado se analizarán dos eventos caracterizados por una alta intensidad de lluvia pero corta duración. El primer evento comienza el 17/09/2010 a las 00:35 y acaba el 17/09/210 a las 01:15 y la precipitación total es de 25.2 mm.

Este evento de lluvia es un claro ejemplo de la capacidad de reducción de caudal pico que tienen las cubiertas verdes, ya que en el caso de una cubierta convencional en esta tormenta el caudal pico alcanza los 14.5 l/s, en cambio para la cubierta vegetal este pico será de tan solo 0.5 l/s y nulo para el caso de los dos paquetes de tejado más gruesos.

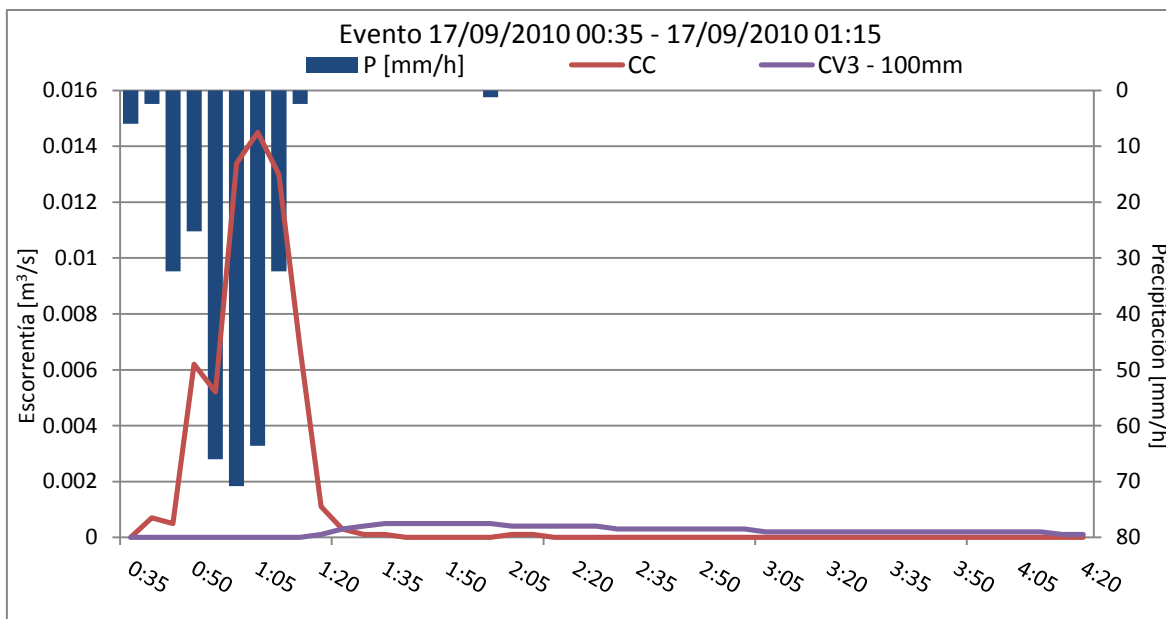


Figura 44: Escenario 1 - Barcelona - Evento 4

	R [mm]	R _{coef}	R _p [l/s]
CV1-200	0.000	0.000	0
CV2-150	0.000	0.000	0
CV3-100	4.431	0.176	0.5
CC	25.244	1	14.5

Tabla 32: Escenario 1 - Barcelona - Evento 4

El caso del siguiente evento que ocurre el 17/09/2010 a las 17:35 y finaliza el mismo día a las 21:05 con una precipitación total de 19.6 mm, tiene unas características muy similares al evento anterior. En este caso, para unas intensidades menores de lluvia se consigue producir escorrentía en las tres cubiertas vegetales, esto se debe a que el sustrato ya estaba ligeramente saturado debido a los eventos de lluvia anteriores.

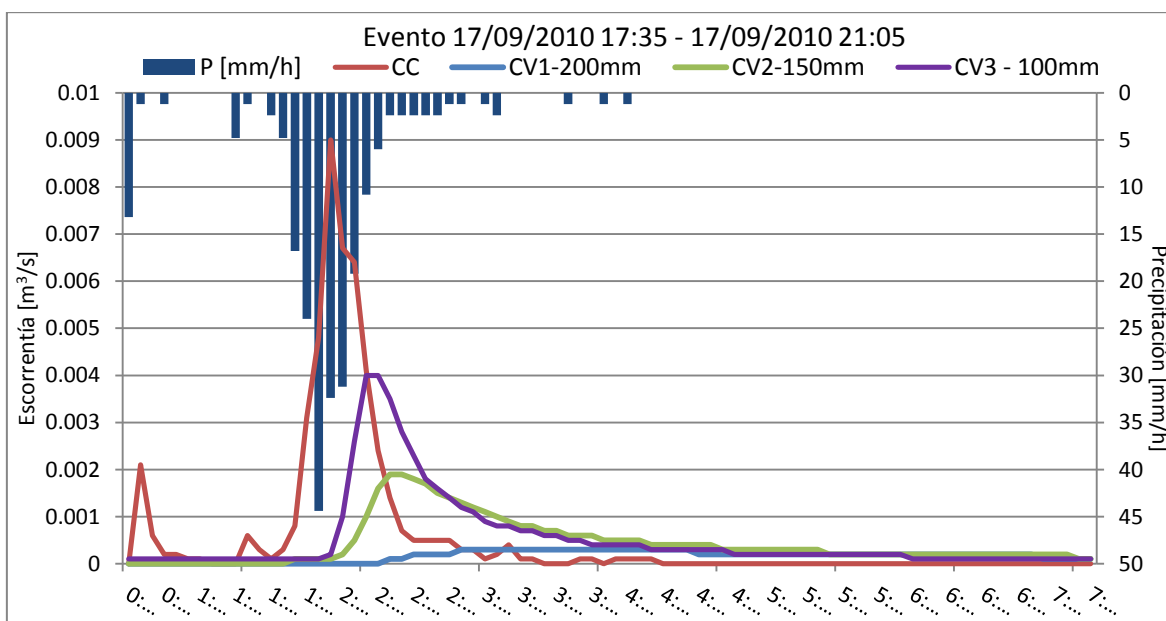


Figura 45: Escenario 1 - Barcelona - Evento 5

	R [mm]	R _{coef}	R _P [l/s]
CV1-200	5.407	0.276	0.3
CV2-150	14.512	0.740	1.9
CV3-100	17.886	0.913	1.9
CC	19.6	1	4

Tabla 33: Escenario 1 - Barcelona - Evento 5

8.3.2. GRANOLLERS

Para el caso del escenario en que se considera un año normal se ha realizado la simulación correspondiente a Granollers con los valores de precipitación y evapotranspiración de dicha zona y se han obtenido los resultados computados anualmente que se muestran en la siguiente tabla resumen:

	P [mm]	ET [mm]	R. [mm]	R _P [l/s]	R _{Coef}
CV1-200	543.23	235.01	300.36	7.4	0.553
CV2-150	543.23	218.41	324.93	8.3	0.598
CV3-100	543.23	185.64	357.67	9.1	0.658
CC	543.23	34.04	509.19	18.9	0.937

Tabla 34: Escenario 1 – Granollers

En este caso, la capacidad de las cubiertas vegetales para reducir la escorrentía y los caudales pico es ligeramente inferior que, en el caso de instalarlas en Barcelona, aunque aún así, los rendimientos son importantes.

Se observa como el coeficiente de escorrentía de los tejados con sustratos de espesor 200 y 150 mm son muy parecidos. Y en los tres paquetes de tejado verde la diferencia de escorrentía total está muy por debajo en comparación con una cubierta convencional.

En este caso, las tormentas con una lluvia acumulada inferior a los 20 mm no producirán escorrentía en ninguna de las cubiertas vegetales, por lo que los eventos que se van a analizar a continuación tendrán un volumen de agua precipitada mayor.

De igual forma que se ha hecho para el caso de la simulación en Barcelona, en la siguiente imagen se muestra la evolución del contenido de agua de la cubierta con un sustrato de 200 mm a lo largo de la simulación. En este caso se observa como el sustrato estará por debajo del contenido mínimo necesario para la supervivencia de las plantas. Por lo tanto, en este caso el riego puntual en periodos secos es recomendado.

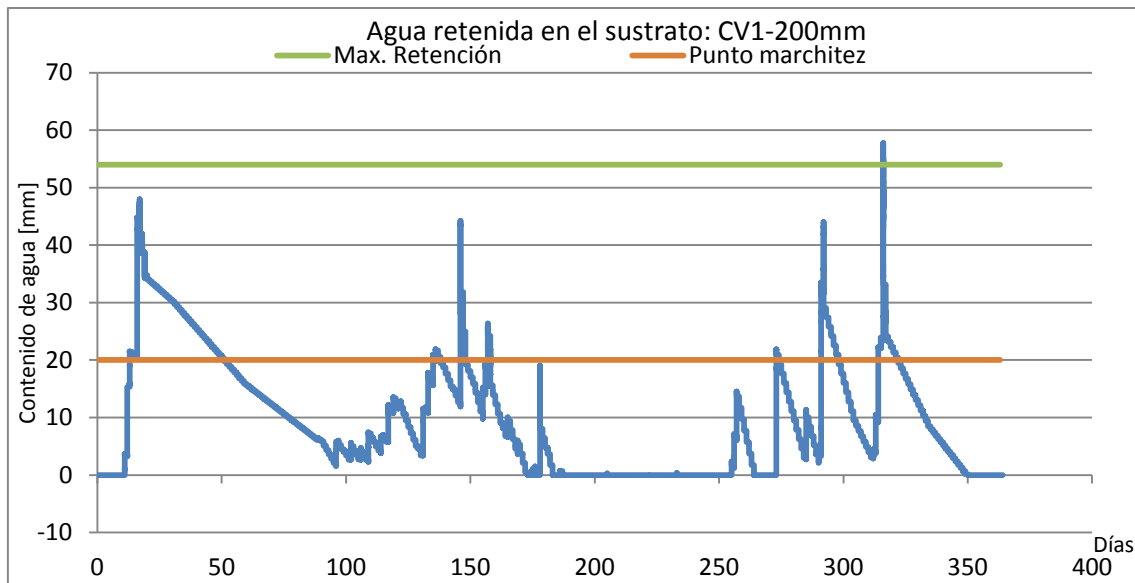


Figura 46: Agua retenida CV1-200mm - Granollers 1

Evento 1

Este evento de lluvia comienza el día 17/01/1988 a las 11:15 y termina el día 20/01/1988 a las 08:25. La precipitación total acumulada es de 72.58 mm.

En este evento es de interés observar como los picos de intensidad de lluvia producidos a lo largo del evento de precipitación son absorbidos por las cubiertas vegetales.

Para este caso, la cubierta de mayor espesor está reduciendo notablemente más tanto el caudal pico de escorrentía como el volumen total.

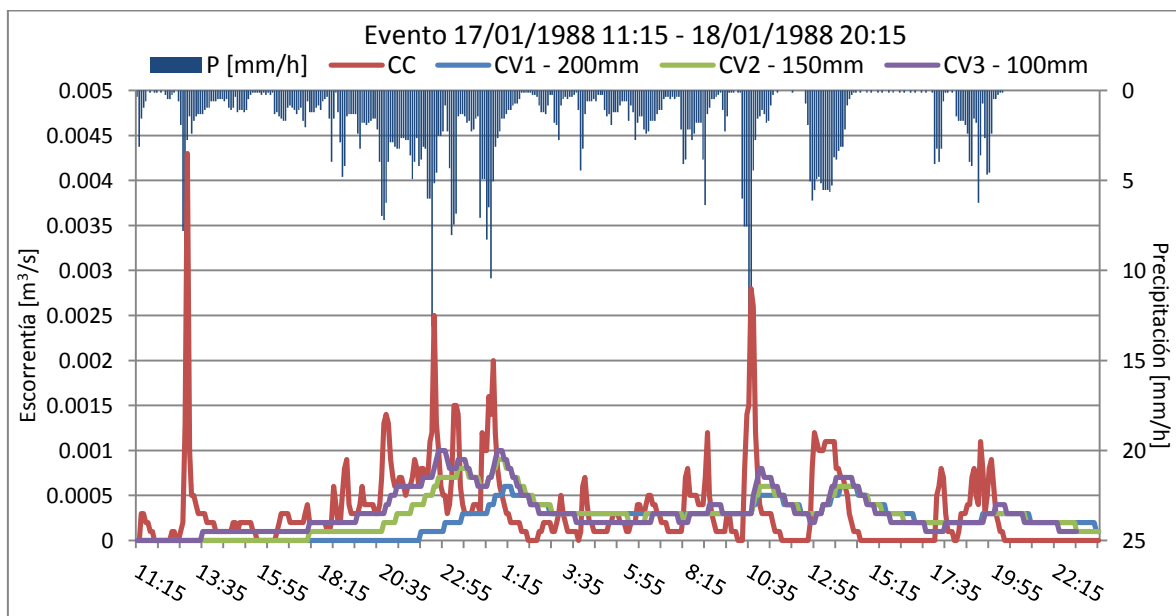


Figura 47: Escenario 1 - Granollers - Evento 1

	R [mm]	R _{coef}	R _P [l/s]
CV1-200	38.862	0.651	0.6
CV2-150	49.390	0.827	0.9
CV3-100	55.244	0.925	1
CC	58.943	0.987	4.3

Tabla 35: Escenario 1 - Granollers - Evento 1

Evento 2

Este evento de lluvia comienza el día 26/05/1988 a las 16:10 y termina el mismo día a las 21:30. La precipitación total acumulada es de 39 mm. Se observa como para los dos espesores más grandes la escorrentía es prácticamente nula y constante a lo largo del tiempo.

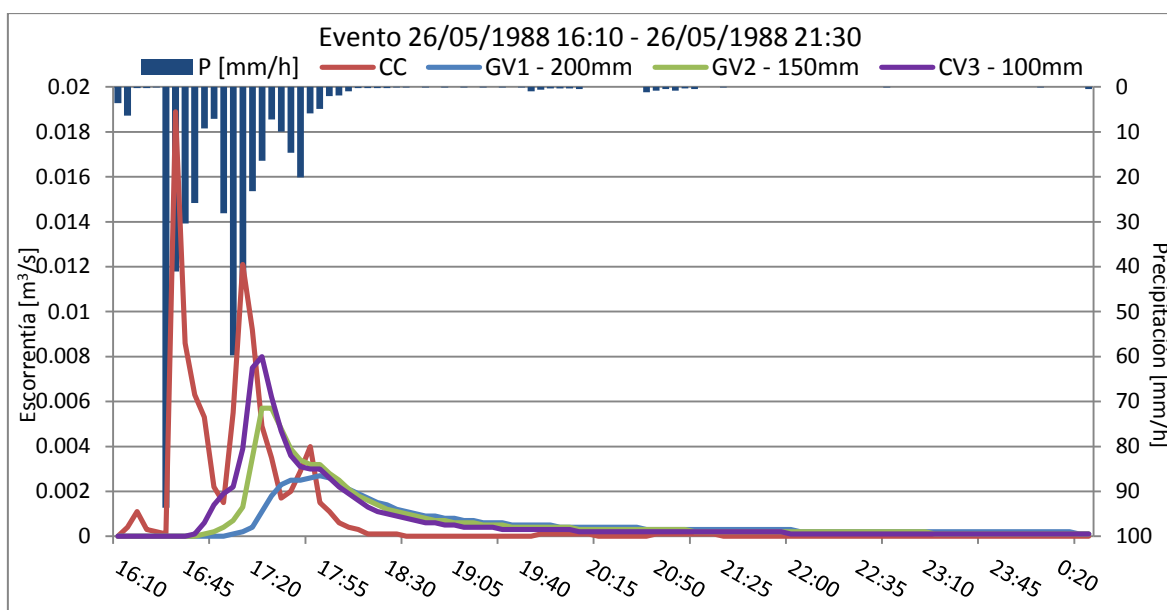


Figura 48: Escenario 1 - Granollers - Evento 2

Se observa con claridad como el pico de escorrentía que produce la cubierta vegetal es reducido y retrasado en el tiempo.

	R [mm]	R _{coef}	R _P [l/s]
CV1-200	23.008	0.591	2.7
CV2-150	28.902	0.742	5.7
CV3-100	31.341	0.805	8
CC	39.000	1	18.9

Tabla 36: Escenario 1 - Granollers - Evento 2

Evento 3

Este evento de lluvia comienza el día 27/06/1988 a las 00:50 y termina el mismo día a las 05:35. La precipitación total acumulada es de 21.82 mm. Parece un evento con una lluvia escasa, pero al producirse tras un evento importante tiene consecuencias sobre la escorrentía generada en las cubiertas verdes. Además se produce una intensidad de lluvia importante durante unos minutos.

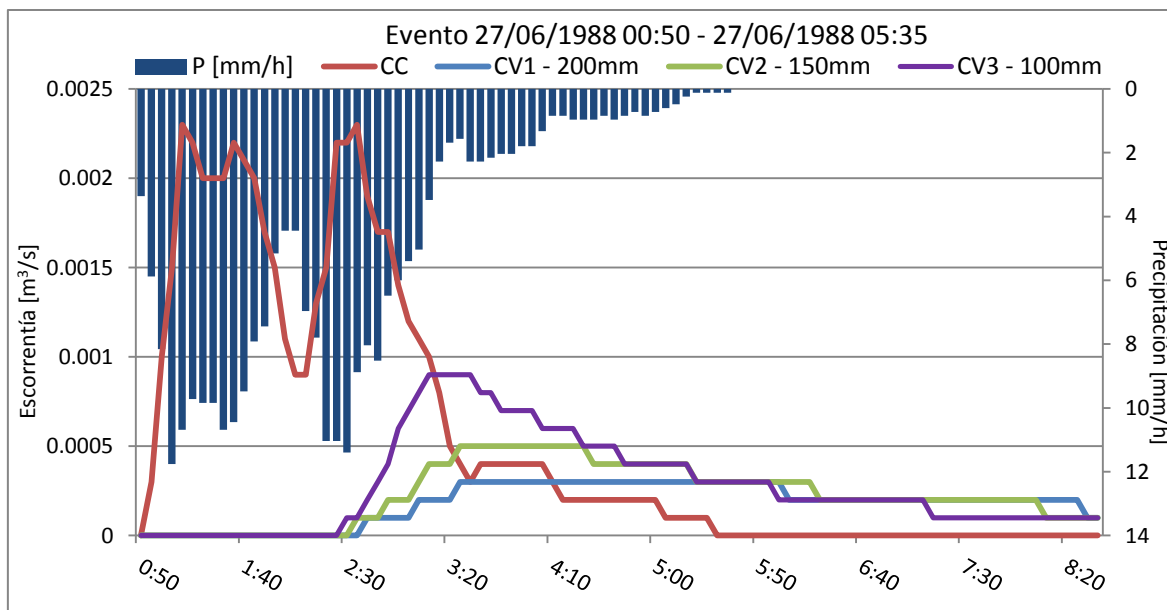


Figura 49: Escenario 1 - Granollers - Evento 3

	R [mm]	R _{coef}	R _p [l/s]
CV1-200	6.870	0.315	0.3
CV2-150	8.740	0.401	0.5
CV3-100	10.732	0.492	0.9
CC	21.463	0.984	2.3

Tabla 37: Escenario 1 - Granollers - Evento 3

En este caso, lo más remarcable es la reducción del caudal pico, además, por su puesto de la reducción de volumen de escorrentía.

Evento 4

Este evento de lluvia comienza el día 12/11/1988 a las 07:15 y termina el mismo día a las 20:55. La precipitación total acumulada es de 132.44 mm.

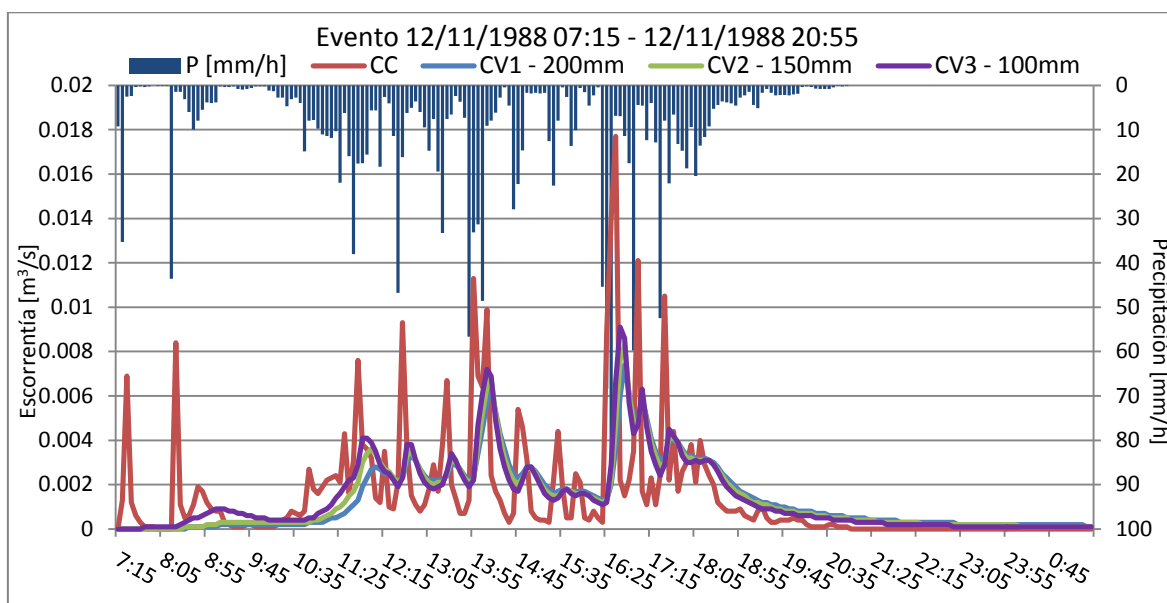


Figura 50: Escenario 1 - Granollers - Evento 4

	R [mm]	R _{coef}	R _P [l/s]
CV1-200	123.415	0.932	7.4
CV2-150	125.244	0.946	8.3
CV3-100	129.675	0.979	9.1
CC	132.44	1	17.7

Tabla 38: Escenario 1 - Granollers - Evento 4

En este caso, el volumen total de escorrentía no se reduce de manera notable, pero es clara la reducción del caudal pico, cómo las cubiertas verdes son capaces de amortiguar las mayores intensidades del evento.

8.4. ESCENARIO 2

En este segundo caso se ha supuesto un año seco, es decir, se supone que los años previos al año simulado han sido secos y el comportamiento hídrico de las plantas se considera déficit o supervivencia. En este caso la evapotranspiración será menor, ya que las plantas tenderán a limitar su consumo de humedad del suelo para aumentar su supervivencia en el tiempo, es decir tendrán un comportamiento más conservador. Por esta razón, probablemente las pérdidas se esperan menores y por tanto un coeficiente de escorrentía mayor.

8.4.1. BARCELONA

En el caso de la simulación hecha con los valores de precipitación y evapotranspiración correspondientes a Barcelona bajo la hipótesis de un año seco, se han obtenido los resultados computados anualmente que se muestran en la siguiente tabla resumen.

En este caso no se cree necesario analizar los eventos más importantes que se producen en el año analizado porque los resultados serán muy similares a los obtenidos en la simulación del primer escenario, ya que lo que está cambiando en ambas simulaciones es la evapotranspiración, y esta afecta a los resultados cuando se evalúan de forma global.

	P [mm]	ET [mm]	R _T [mm]	P _R [l/s]	R _{Coef}
CV1-200	538.9	200.20	322.46	0.9	0.598
CV2-150	538.9	183.17	339.50	2	0.630
CV3-100	538.9	161.34	363.52	4.1	0.675
CC	538.9	22.65	516.25	14.5	0.957

Tabla 39: Escenario 2 - Barcelona

En comparación con los resultados obtenidos en el escenario 1, los valores de caudal pico no varían, en cambio los valores de evapotranspiración son menores, lo que era esperable debido a que los coeficientes de cultivo son inferiores en este caso debido a la condición de los años secos previos. Una menor evapotranspiración implica que los coeficientes de escorrentía sean ligeramente mayores, es decir, que en un año afectado por las escasas lluvias de los años previos tendrá una menor capacidad de reducción de escorrentía.

Se observa que el volumen total de escorrentía aumenta entre un 16.6% para el caso del sustrato de espesor 200 mm, 15.5% para el espesor intermedio y un 13.7% para el caso del espesor de 100 mm. Esto indica que en condiciones de sequía previa al año estudiado, el espesor más grueso será el que pierda mayor rendimiento en cuanto a capacidad de

reducción de escorrentía, aunque en cantidad total siga siendo el paquete que más volumen es capaz de retener.

8.4.2. GRANOLLERS

De igual forma se ha evaluado la hipótesis del escenario 2 para el caso de Granollers. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

	P [mm]	ET [mm]	R _T [mm]	P _R [l/s]	R _{Coeff}
CV1-200	543.23	189.72	339.11	7.4	0.624
CV2-150	543.23	176.18	361.28	8.3	0.665
CV3-100	543.23	155.38	387.93	9.1	0.714
CC	543.23	34.04	509.19	18.9	0.937

Tabla 40: Escenario 2 – Granollers

En este caso, la comparación con los resultados del escenario 1 es muy similar que para el caso de Barcelona. Los caudales pico no varían, y los coeficientes de escorrentía son ligeramente superiores en este caso debido a una menor evapotranspiración.

Al ser la evapotranspiración menor en el caso de Granollers, el efecto que tiene este escenario sobre las cantidades volumen de escorrentía respecto al primer escenario es menor. El porcentaje de aumento de la escorrentía en este caso es de un 12.9%, 11.2% y 8.5% respectivamente para cada espesor de mayor a menor.

8.5.EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es una realidad que está ocurriendo en nuestro planeta, y sus consecuencias deben de tenerse en cuenta a la hora de diseñar nuestras ciudades. El cambio climático es la modificación del clima respecto al historial climático y puede deberse a causas naturales o humanas. En la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se propuso el término para referirse al cambio por causas antropológicas.

Partiendo de que el cambio climático modifica los fenómenos meteorológicos, éstos pueden llegar a alterar la vida de la personas. Algunas consecuencias que afectan al drenaje urbano es el aumento de zonas impermeables y ausencia de zonas verdes que hacen que el agua escurra rápidamente una vez precipita, lo que produce una rápida saturación del sistema de drenaje y aumento de caudales pico, pudiendo llegar a causar importantes inundaciones o poniendo en riesgo a las personas que circulen por la calle.

Para hacer una evaluación de cómo podría afectar el cambio climático al rendimiento de este sistema de drenaje urbano y el efecto que tendría en la supervivencia de las plantas se ha realizado un estudio del comportamiento hidrológico de los tres paquetes de tejado verde propuestos para un caso hipotético en el que el cambio climático ha modificado las características hidrológicas. Los valores de variaciones tanto de precipitaciones como de evapotranspiración se han tomado de la memoria *Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en Régimen Natural* realizado por el CEDEX [36].

Para evaluar cómo variarán las características climáticas e hidrológicas de una zona debido al efecto del cambio climático se suelen hacer modelos climáticos que representan matemáticamente de manera simplificada el sistema climático de la Tierra. En este caso se

tomarán los valores medios que propone el CEDEX para un escenario futuro dentro de unos 80 años.

Las proyecciones pronostican una reducción generalizada de la precipitación conforme avanza el siglo XXI, según el escenario evaluado y el modelo climático utilizado esta reducción se estima entre un 9% y un 28%. La evolución de la temperatura proyectada en los periodos del siglo XXI muestra tendencias crecientes, los incrementos medios estimados son de aproximadamente de 2.5°C hasta 3.6°C. Este incremento de temperaturas tendrá un efecto en la evapotranspiración. En España, la media de las proyecciones dan incrementos medios de la evapotranspiración potencial, con variaciones de entre el 15% y el 21%.

En este caso se evaluará un escenario desfavorable con una reducción del 20% de las precipitaciones anuales y un incremento de la evapotranspiración de un 20% también. Se analizará bajo las condiciones del escenario 1 y tanto para Barcelona como Granollers.

	P [mm]	ET [mm]	R _T [mm]	P _R [l/s]	R _{Coeff}
CV1-200	424.72	249.19	166.49	0.7	0.392
CV2-150	424.72	232.26	183.42	0.8	0.432
CV3-100	424.72	214.19	201.49	2.3	0.474
CC	424.72	21.4	403.32	11.6	0.950

Tabla 41: Resultados Cambio Climático - Barcelona

	P [mm]	ET [mm]	R _T [mm]	P _R [l/s]	R _{Coeff}
CV1-200	419	236.35	180.07	5.1	0.430
CV2-150	419	210.51	208.59	6.5	0.498
CV3-100	419	174.89	244.17	8.3	0.583
CC	419	12.02	407.53	15	0.973

Tabla 42: Resultados Cambio Climático - Granollers

En ambos casos, al producirse una disminución de la precipitación, los caudales picos de escorrentía se reducen en comparación con el escenario actual. Como era de esperar, al reducirse la precipitación y aumentar la evapotranspiración, está disminuyendo el volumen total de escorrentía, tanto en cantidad como en porcentaje. El gran problema que supondrá un escenario futuro marcado por el cambio climático es la supervivencia de las plantas. Ya se demostró que será necesario instalar un sistema de riego en el caso de que se quiera construir un tejado verde tanto en Barcelona como en Granollers, ya que más de la mitad de los días a lo largo del año, el contenido de agua del sustrato estará por debajo del necesario para que las plantas puedan sobrevivir. En el nuevo escenario de cambio climático, el número de días que estará el sustrato por debajo del nivel mínimo necesario para las plantas será mayor, ya que está precipitando menos agua y aumentando las pérdidas por evapotranspiración.

Para hacernos una idea de cuánto aumentará el tiempo que una cubierta vegetal estará por debajo del punto de marchitez en este nuevo escenario, el porcentaje de tiempo a lo largo del año en un escenario normal que la cubierta vegetal de 200 mm de espesor será del 48.6% en el caso de Barcelona y del 83.7 en el caso de Granollers. En cambio, en un escenario en el que el cambio climático ha modificado las condiciones hidrológicas, el

porcentaje de días que el sustrato no tendrá suficiente contenido de agua para las plantas es de 58.6% en Barcelona y del 85% en Granollers.

Por tanto, en un escenario futuro en el que las condiciones climáticas han variado y se prevé una reducción de los recursos hídricos, las cubiertas verdes deberán tener un mayor aporte de agua de manera artificial, lo cual es contradictorio en cuanto a disponibilidad hídrica.

8.6.CONCLUSIONES

Tras analizar el comportamiento hidrológico de las tres cubiertas vegetales para diferentes escenarios se pueden extraer algunas conclusiones generales.

En primer lugar, los resultados muestran la utilidad de las tres cubiertas vegetales para reducir tanto el volumen de escorrentía como los caudales pico. En función de su espesor la magnitud de esta reducción será diferente, siendo una reducción mayor cuanto mayor es el espesor.

También, se ha demostrado que la instalación de un sistema de riego para aportar agua cuando el sustrato no pueda aportar la cantidad mínima a las plantas, será necesario tanto en la zona de Barcelona como en Granollers. Los aportes hídricos necesarios serán diferentes según el escenario que se plantee cada año. Considerando un año normal que no está afectado por años previos secos, las necesidades hídricas extras serán inferiores que en un escenario futuro en el que el cambio climático a modificado las condiciones hidrológicas.

Se ha detectado un aspecto del modelo SWMM5 que se debe tener en cuenta a la hora de evaluar el contenido de agua en el sustrato, ya que el programa limita la evapotranspiración según el contenido mínimo de agua en el sustrato que necesitan las plantas, es decir, el punto de marchitez. De esta manera, cuando el sustrato alcanza un contenido de agua igual al punto de marchitez, el modelo deja de tener en cuenta la evapotranspiración, asumiendo que ésta ya no afecta al balance hídrico. Esta hipótesis no parece acertada si se tiene en cuenta que si el periodo de altas temperaturas y ninguna precipitación, el agua del sustrato seguirá evaporándose, aunque quizá a menor velocidad debido a que se encuentra en los poros intersticiales del sustrato.

El efecto de la evapotranspiración tiene un efecto cuando se realiza un cómputo anual del balance hidrológico. Cuando se analizan los eventos de mayores intensidades de manera aislada se observa que la evapotranspiración no tiene un gran efecto, por lo que, en este caso, los resultados del escenario 1 y el escenario 2 son muy similares. El mayor beneficio en el caso de que se den eventos de gran intensidad es la notable reducción del caudal de escorrentía, así como su retraso en el tiempo. De esta manera se produce una laminación de caudales que ayuda a evitar la saturación del sistema de drenaje tradicional al que finalmente drenarán las aguas.

A la hora de evaluar el efecto del cambio climático se debería de realizar un análisis más exhaustivo de cómo se modificarán las características climáticas, ya que se prevé una disminución de precipitaciones y aumento de la evapotranspiración, pero también se hacen proyecciones de futuro en el que la distribución espacial y temporal de las

precipitaciones se verán modificadas, además se prevé que se produzcan eventos torrenciales con intensidades asociadas mayores que las que se producen actualmente.

9. CONCLUSIONES

Parece que los tejados verdes como técnica de drenaje urbano suponen una solución razonable para paliar los problemas de inundación que se producen en las ciudades del litoral mediterráneo debido a la alta impermeabilización de las zonas urbanas y los eventos torrenciales característicos del clima de estas zonas.

Los objetivos que persiguen los tejados verdes encajan con las nuevas exigencias de sostenibilidad de nuestra sociedad. Los tejados verdes reducen el volumen de escorrentía generada y por tanto se descarga la red de drenaje, reducen la contaminación que llega a los medios receptores y aporta otros beneficios medioambientales y sociales a la ciudad.

La implantación de los tejados verdes supone un coste superior al de una cubierta convencional, pero también suponen una reducción de los costes para los vecinos de las fincas con estas medidas debido al ahorro por un mejor aislamiento térmico y un aumento de la vida útil de las cubiertas. Por otro lado, como se ha dicho, se aportan otros co-beneficios sociales y ambientales para la ciudad en su conjunto.

En este contexto, y tras realizar el estudio del comportamiento de diferentes paquetes de tejado verde bajo diferentes condiciones, se proponen resultados para tejados verdes con sustratos de diferentes espesores: 200 mm, 150 mm y 100 mm. Cada uno de ellos tiene diferentes ventajas y se deberá realizar un balance entre la reducción de escorrentía que se desea y la capacidad estructural del edificio. Se ha demostrado que las sobrecargas que suponen los paquetes de tejado verde son de gran importancia, por lo que la capacidad estructural del edificio se convertirá en un aspecto esencial a la hora de instalar este tipo de cubiertas.

En relación al comportamiento hidrológico de las cubiertas verdes, el mayor beneficio es la reducción de los caudales punta. Se deberá elegir el espesor del sustrato en función de cuanto volumen de escorrentía se desea reducir. Según los resultados obtenidos en este estudio, un espesor de 200 mm permitirá reducir entorno al 50% del volumen total de un evento de lluvia intenso en comparación con una cubierta convencional. Para el caso de un sustrato de espesor 100 mm, el porcentaje de reducción de volumen de escorrentía será de un 40% que variará ligeramente según las condiciones climatológicas.

Mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros con los que se puede definir el paquete de tejado verde en el programa SWMM5. Se ha determinado que los parámetros que más afectan al comportamiento hídrico de un tejado verde son la capacidad de detención de agua y por ende, la porosidad, así como la permeabilidad y la altura de berma. Por supuesto el espesor será un factor determinante, ya que a mayor espesor, las propiedades del sustrato se ven aumentadas. Por ejemplo, dos paquetes de sustrato con las mismas propiedades pero con diferente espesor tendrán una capacidad de reducción de escorrentía diferente, siendo el paquete de mayor grosor el que más escorrentía pueda reducir. En cuanto a la altura de berma, no tiene por qué ser muy alta, simplemente debe tener una altura suficiente para retener el agua durante las mayores intensidades de las precipitaciones evitando que se produzca escorrentía superficial en las cubiertas vegetales.

El modelo SWMM5 es una herramienta muy útil a la hora de evaluar el comportamiento hídrico de diferentes técnicas de drenaje urbano, que en este caso han sido los tejados verdes. Se ha detectado que el software solo considera el efecto de la evapotranspiración cuando el sustrato tiene más agua del límite de agua que necesitan las plantas para su supervivencia, es decir, el punto de marchitez. Debido a esta hipótesis, el programa asume que las plantas nunca morirán. Sin embargo, esta hipótesis no parece acertada si se tiene en cuenta un periodo de altas temperaturas y ninguna precipitación, el agua del sustrato seguirá evaporándose, aunque quizá a menor velocidad debido a que se encuentra en los poros intersticiales del sustrato.

Se ha demostrado que sea cual sea el espesor, el mantenimiento de un tejado verde en la costa Mediterránea necesitará un sistema de riego que asegure la supervivencia de las plantas en los periodos de déficit hídrico. Según las condiciones climáticas la cantidad de agua que se debe aportar de manera artificial será diferente, pero se estima que en un escenario futuro en el que el cambio climático ha modificado las características hidrológicas, el déficit hídrico será mayor que el que se estima actualmente. Este hecho puede resultar un problema futuro, en el que los recursos hídricos serán menores pero la necesidad de riego mayor.

En la misma línea de la concepción de un tejado verde, se ha observado que la construcción de una berma es necesaria, no solamente como protección del sustrato y plantas frente a viento y deslizamientos, sino como elemento para aumentar la reducción de escorrentía. Esta altura no tiene por qué ser muy alta, simplemente debe tener una altura suficiente para retener el agua cuando se produzcan intensidades altas evitando que se produzca escorrentía superficial debido a la diferencia entre la intensidad de lluvia y permeabilidad del sustrato.

Administraciones públicas, sobre todo a nivel internacional, están incentivando soluciones de este tipo. La ciudad de Barcelona, en los últimos años, ha empezado también a promover la implementación de tejados verdes.

10. REFERENCIAS

- [1] *OECD Environmental Outlook to 2050*. OECD Publishing, 2012.
- [2] M. G. Valentin, "Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores," *ResearchGate*, no. Marzo, 1994.
- [3] M. Gómez, "Hidrología urbana," *Colección CBI*, p. 235, 2007.
- [4] L. Benvenuty, "Colau resucita el plan de Mayol para ajardinar azoteas," *La Vanguardia*, Barcelona, 16-May-2017.
- [5] AMB, "www.amb.cat," 2017. [Online]. Available: <http://www.amb.cat/es/web/area-metropolitana/dades-estadistiques/territori/sol>. [Accessed: 21-May-2017].
- [6] M. Valbuena Villalonga, "Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real," Universitat Politècnica de Barcelona, 2016.
- [7] J. Martín-Vide and M. C. Llasat Botija, "Las precipitaciones torrenciales en Cataluña," *Ser. Geográfica*, no. 9, pp. 17–26, 2000.
- [8] J. Carlos and G. Codron, "Las Ciudades Españolas Y El Riesgo De Inundación : Permanencia Y Cambio De Un Problema Crónico," *Boletín la A.G.E.*, vol. N.º 37, pp. 85–100, 2004.
- [9] M. Gómez, B. Russo, and F. Macchione, "Modelo físico para el estudio de los criterios de riesgo en zonas urbanas," *XXIV Congr. Latinoam. Hidráulica*, 2010.
- [10] "Resiliencia – ONU-Habitat español," 2017. [Online]. Available: <https://es.unhabitat.org/temas-urbanos/resiliencia/>. [Accessed: 24-May-2017].
- [11] J. Rodriguez, J. Rodriguez, E. Gómez-ullate, and D. Castro, "Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible . Suds," *Interciencia Rev. Cienc. y Tecnol. América*, vol. 30, no. 5, pp. 255–260, 2005.
- [12] T. D. Fletcher *et al.*, "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage," *Urban Water J.*, vol. 12, no. 7, pp. 525–542, 2015.
- [13] J. Anta Álvarez, J. Puertas Agudo, J. Suárez López, H. Del Río Cambeses, and D. Hernandez Oubiña, "Gestión de las Aguas Pluviales en Ámbito Urbano," *Gest. Las Aguas Pluviales - Implicaciones Sist. Saneam.*, pp. 381–398, 2008.
- [14] U. Berardi and A. Ghaffarianhoseini, "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs," *Appl. Energy*, vol. 115, no. March, pp. 411–428, 2015.
- [15] AJUNTAMENT DE BARCELONA, "Guia de terrats vius i cobertes verdes," Barcelona, 2015.
- [16] D. G. Roofs and P. I. Plan, *Green Roofs and Walls Policy Implementation Plan*. Sidney, 2013.
- [17] CIRIA, *The SuDS manual*. 2015.
- [18] S. Wilkinson and T. Dixon, *Green Roof Retrofit. Building Urban Resilience*. Chicester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2016.

- [19] C. O. de I. T. A. y P. Agrícolas, *Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisaje - Cubiertas ecológicas exentivas*. Barcelona, 1999.
- [20] ZinCo, "Guía técnica de planificación: Sistemas para ajardinar cubiertas inclinadas," 2015.
- [21] ZinCo, "Guía de planificación: Sistemas para cubiertas verdes extensivas," 2015.
- [22] J. Breuning, G. Roof, S. Llc, and G. Roof, "Fire & wind on extensive green roofs," in *Sixth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities*, 2008, pp. 1–6.
- [23] Optigreen, "TECHNIC AL BROCHURE GREEN ROOFS," 2011.
- [24] S. Rueda and et all, "Cobertes i Murs Verds a Barcelona," Barcelona, 2010.
- [25] E. C. Snodgrass and L. McIntyre, *The Green Roof Manual*, 1st ed. Portland: Timber Press, 2010.
- [26] J. Breuning, "The Economics of Green Roofs from the Perspective of the Commercial Client," pp. 1–6, 2014.
- [27] AJUNTAMENT DE BARCELONA, "Mesura de Govern per a impulsar TERRATS VIUS I COBERTES VERDES a Barcelona," 2014.
- [28] EPA, "Storm Water Management Model User â€™s Manual Version 5 . 1 Storm Water Management Model," no. September, 2015.
- [29] A. Palla, C. Berretta, L. G. Lanza, and P. La Barbera, "Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale," ... *Conf. Urban ...*, pp. 1–10, 2008.
- [30] S. De-ville, M. Menon, X. Jia, G. Reed, and V. Stovin, "The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance," *J. Hydrol.*, vol. 547, pp. 332–344, 2017.
- [31] M. Carmen and C. Castillo, "Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya . Modelización y clasificación objetiva," Universitat de Barcelona, 1995.
- [32] "Idescat. Anuario estadístico de Cataluña." [Online]. Available: <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&t=2014&lang=es>. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [33] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. 2006.
- [34] F. Elías Castillo and R. Giménez Ortiz, *Evapotranspiraciones Potenciales y Balances de Agua en España*. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas, 1965.
- [35] M. A. Harivandi, J. Baird, J. Hartin, M. Henry, and D. Shaw, "Managing Turfgrasses during Drought," no. August, pp. 1–9, 2009.
- [36] CEDEX, "Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural," Madrid, 2011.